ATRIO

María Cristina Vallejo

Cuando la moneda es la energía

Manual de cuentas ambientales de la economía ecuatoriana

FLACSO Ecuador

Cuando la moneda es la energía. Manual de cuentas ambientales de la economía ecuatoriana

María Cristina Vallejo

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

VALLEJO, M. C. *Cuando la moneda es la energía.* Manual de cuentas ambientales de la economía ecuatoriana [online]. Quito: Editorial FLACSO Ecuador, 2023, 234 p. Atrio series. ISBN: 978-9978-67-644-8. Available from: https://books.scielo.org/id/vcp84. https://doi.org/10.46546/2023-40atrio.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribição 4.0.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimento 4.0.

María Cristina Vallejo

Cuando la moneda es la energía.

Manual de cuentas ambientales de la economía ecuatoriana

Editorial FLACSO Ecuador

© 2023 FLACSO Ecuador
Abril de 2023

Cuidado de la edición: Editorial FLACSO Ecuador

ISBN: 978-9978-67-643-1 (impreso)
ISBN: 978-9978-67-644-8 (pdf)
https://doi.org/10.46546/2023-40atrio

FLACSO Ecuador
La Pradera E7-174 y Diego de Almagro, Quito-Ecuador
Telf.: (593-2) 294 6800 Fax: (593-2) 294 6803
www.flacso.edu.ec

Fotografía de portada: Mike_Shots - Shutterstock

Vallejo, María Cristina

Cuando la moneda es la energía. Manual de cuentas ambientales de la economía ecuatoriana / María Cristina Vallejo. Quito, Ecuador : FLACSO Ecuador, 2023

xiv, 220 páginas : ilustraciones, gráficos, tablas . - (Serie Atrio)

ISBN: 9789978676431 (impeso)
ISBN: 9789978676448 (pdf)
https://doi.org/10.46546/2023-40atrio

Bibliografía: p. 203-211

ECONOMÍA DE LA TIERRA ; ECONOMÍA DE LA ENERGÍA ; ECONOMÍA MEDIO AMBIENTAL ; SISTEMA ECONÓMICO ; CONDICIONES SOCIALES ; ECUADOR

333 - CDD

A En la serie Atrio se publican obras arbitradas.

A Mikel, Xabi y Angel,
los amores de mi vida…

Índice de contenidos

Abreviaturas xiii

Prefacio xv

Introducción 1

Capítulo 1
Matriz insumo-producto física desde el modelo de energía primaria incorporada 6
Marco conceptual y revisión del estado del arte 6
Fuentes de datos y preparación de la información 8
Método 12
Resultados 28
Comentarios finales 35

Capítulo 2
Modelo de unidades híbridas 37
Marco conceptual y revisión del estado del arte 37
Fuentes de información y procesamiento de los datos 39
Método 43
Resultados 56
Comentarios finales 67

Capítulo 3
Modelo de precios implícitos o intensidades ecológicas 68
Marco conceptual y revisión del estado del arte 70
Preparación de la información 72
Método 75
Resultados 86
Comentarios finales 112

Capítulo 4
Cuando la moneda es la energía: matrices insumo-producto físicas para la economía ecuatoriana, 2010-2016 114
El método de la energía incorporada (MEI) 114
El método de unidades híbridas (MUH) 123
El método de precios implícitos 132
Comentarios finales 141

Capítulo 5
Encadenamientos económicos y energéticos y su clasificación 142
Estudio de los encadenamientos productivos 143
Resultados 167
Comentarios finales 194

Conclusiones 195

Referencias 203

Anexos

Anexo 1
Codificación de los sectores económicos con base en la tabla de utilización Ecuador 2016 213

Anexo 2
Encadenamientos en el sistema económico 216

Ilustraciones

Gráficos

Gráfico 1.1 Lecturas del balance energético 8
Gráfico 4.1. Flujos de intercambio energético. MEI 116
Gráfico 4.2. Composición del consumo final y oferta total de energía. MEI 116
Gráfico 4.3. Composición de la oferta total de energía. MEI 117
Gráfico 4.4. Requerimientos directos de energía. MEI 117
Gráfico 4.5. Requerimientos totales de energía. MEI 119
Gráfico 4.6. Requerimientos energéticos de la transformación. MEI. 119
Gráfico 4.7. Consumo interindustrial de energía por principales consumidores. MEI. 121
Gráfico 4.8. Intercambios intersectoriales económicos y energéticos. MEI 121
Gráfico 4.9. Transacciones económicas intersectoriales. MUH 124
Gráfico 4.10. Oferta y demanda económica asociada a los intercambios energéticos. MUH. 125
Gráfico 4.11. Flujos energéticos intersectoriales. MUH 125
Gráfico 4.12. Oferta y demanda energética. MUH. 126
Gráfico 4.13. Condiciones de balance-insumos netos del sistema. MUH 126
Gráfico 4.14. Requerimientos totales de energía $\alpha^{H}\hat{x}^{*}$. MUH. 130
Gráfico 4.15. Coeficientes energéticos totales ε^{H}. MUH. 131
Gráfico 4.16. Precios implícitos para valores no nulos. MPINH. 133
Gráfico 4.17. Coeficientes energéticos directos. MPINH 135
Gráfico 4.18. Requerimientos directos e indirectos de energía. MPINH. 135
Gráfico 4.19. Precios implícitos homogéneos 137
Gráfico 4.20. Condiciones de balance del sistema. MPI 137
Gráfico 4.21. Requerimientos directos de energía. MPI 139
Gráfico 4.22. Requerimientos totales de energía. MPI 139
Gráfico 4.23. Requerimientos energéticos totales según el método de análisis. 140
Gráfico 5.1. Consumo ponderado de energía. MEI 169
Gráfico 5.2. Sectores energéticos clave. MEI. 169
Gráfico 5.3. Sectores energéticos impulsores de la oferta. MEI 172
Gráfico 5.4. Sectores energéticos impulsores de la demanda. MEI 172
Gráfico 5.5. Sectores energéticos independientes. MEI. 174
Gráfico 5.6. Sectores manufactureros de destino intermedio. MEI 174
Gráfico 5.7. Sectores manufactureros de destino final. MEI 176
Gráfico 5.8. Sectores no manufactureros de destino intermedio. MEI. 176

Gráfico 5.9. Sectores no manufactureros de destino final. MEI. 177
Gráfico 5.10. Encadenamientos propios y puros hacia adelante. MEI. 179
Gráfico 5.11. Encadenamientos propios y puros hacia atrás. MEI. 179
Gráfico 5.12. Sectores clave. MUH 181
Gráfico 5.13. Sectores impulsores de la oferta. MUH. 181
Gráfico 5.14. Sectores impulsores de la demanda. MUH 183
Gráfico 5.15. Sectores independientes. MUH 183
Gráfico 5.16. Sectores manufactureros de destino intermedio. MUH. 185
Gráfico 5.17. Sectores manufactureros de destino final. MUH. 185
Gráfico 5.18. Sectores no manufactureros de destino intermedio. MUH 187
Gráfico 5.19. Sectores no manufactureros de destino final. MUH 187
Gráfico 5.20. Encadenamientos propios y puros hacia adelante. MUH 189
Gráfico 5.21. Encadenamientos propios y puros hacia atrás. MUH 189
Gráfico 5.22. Clasificación sectorial por los intercambios energéticos. MEI 191
Gráfico 5.23. Clasificación sectorial por los intercambios energéticos. MUH 192
Gráfico 5.24. Clasificación sectorial por los intercambios económicos 193
Gráfico A.1. Sectores económicos clave 218
Gráfico A.2. Sectores económicos impulsores de la oferta. 218
Gráfico A.3. Sectores económicos impulsores de la demanda 219
Gráfico A.4. Sectores económicos independientes. 219

Tablas

Tabla 1.1. Transformación en centros de gas (10^3 bep) 10
Tabla 1.2. Estructura genérica de una matriz insumo-producto física 14
Tabla 1.3. Compatibilidad de las categorías de energía entre unidades monetarias y físicas 21
Tabla 1.4. Categorías de análisis que compatibilizan la tabla de utilización con el balance energético 27
Tabla 1.5. Entradas y salidas de energía (10^6 bep). 29
Tabla 1.6. Requerimientos directos de energía 29
Tabla 1.7. Requerimientos totales de energía 29
Tabla 1.8. Eficiencia energética del sistema (bep invertido/bep producido). 31
Tabla 1.9. Eficiencia energética del sistema. Ecuador 2013 (bep invertido/bep producido) 31
Tabla 1.10. Matriz de flujos económicos de los sectores que consumen energía (millones de dólares de 2007). 31
Tabla 1.11. Coeficientes técnicos 31
Tabla 1.12. Consumo final de energía (10^6 bep). 33
Tabla 1.13. Consumo interindustrial de energía (10^6 bep) 33
Tabla 1.14. Intensidad de emisiones de CO_2 (ton CO_2/TJ) 33
Tabla 1.15. Emisiones de CO_2 por fuente. 34
Tabla 1.16. Emisiones de CO_2 intersectoriales (Gg de CO_2). 34
Tabla 1.17. Flujos energéticos (10^6 bep) 34

Tabla 1.18. Cuentas satélite $\tilde{S}^p$ y participación de las cuentas satélites en la oferta total $\tilde{D}^s$ (10^6 bep) 35
Tabla 2.1. Categorías de recursos energéticos contrastables con las fuentes de energía disponibles en el balance energético 40
Tabla 2.2. Extracto de la tabla de utilización. Ecuador 2016 (10^3 $ de 2007, pc) 42
Tabla 2.3. Representación de las transacciones interindustriales 44
Tabla 2.4. Insumos y productos energéticos de la transformación (10^3 bep) 55
Tabla 2.5. Matriz insumo-producto (10^6 $ de 2007) 58
Tabla 2.6. Flujos energéticos (bep 10^6) 58
Tabla 2.7. Transacciones intersectoriales. MUH 58
Tabla 2.8. Coeficientes directos. MUH 59
Tabla 2.9. Coeficientes totales. MUH. 59
Tabla 2.10. Oferta energética (bep 10^6). MUH 59
Tabla 2.11. Coeficientes de requerimientos energéticos totales y directos. MUH 59
Tabla 2.12. Requerimientos energéticos totales (valor absoluto, 10^6 bep). MUH 61
Tabla 2.13. Condición de conservación de energía en el sistema (10^6 bep). MUH 61
Tabla 2.14. Coeficientes energéticos relativos (bep/10^3 $ de 2007). MUH 61
Tabla 2.15. Coeficientes energéticos totales (bep/10^3 $ de 2007). MUH 61
Tabla 2.16. Insumos y productos energéticos de la transformación (10^3 bep) 63
Tabla 2.17. Transacciones intersectoriales. MUH con pérdidas en la conversión 63
Tabla 2.18. Coeficientes directos. MUH con pérdidas en la conversión 63
Tabla 2.19. Coeficientes totales. MUH con pérdidas en la conversión 65
Tabla 2.20. Coeficientes de eficiencia energética. MUH con pérdidas en la conversión. 65
Tabla 2.21. Coeficientes de requerimientos energéticos totales α^{**} y directos δ^{**}. MUH con pérdidas en la conversión 65
Tabla 2.22. Requerimientos energéticos totales (valor absoluto, 10^6 bep). MUH con pérdidas en la conversión 66
Tabla 2.23. Coeficientes energéticos totales (bep/10^3 $ de 2007). MUH con pérdidas en la conversión 66
Tabla 2.24. Principales resultados del escenario base y su variante. 66
Tabla 3.1. Matriz de precios implícitos ($ de 2007/bep) 88
Tabla 3.2. Matriz de flujos energéticos con PINH (10^6 bep) 88
Tabla 3.3. Cuentas satélite con PINH (10^6 bep) 88
Tabla 3.4. Coeficientes técnicos de los flujos ecológicos con PINH 90
Tabla 3.5. Matriz de flujos energéticos con PINH (10^6 bep) 90
Tabla 3.6. Intensidad energética directa con PINH (bep/10^3 $ de 2007) 90
Tabla 3.7. Intensidad energética total con PINH (bep/10^3 $ de 2007) 91
Tabla 3.8. Matriz de flujos económicos con PIH (10^6 $ de 2007) 93
Tabla 3.9. Oferta total de energía con PIH (10^6 bep) 93
Tabla 3.10. Precios promedio de la energía por sectores ($ de 2007/bep) 93
Tabla 3.11. Matriz de flujos energéticos con PIH (10^6 bep) 95
Tabla 3.12. Condición de conservación (10^6 bep). 95
Tabla 3.13. Matriz de flujos energéticos con PIH (10^6 bep) 95
Tabla 3.14. Coeficientes técnicos de los flujos ecológicos (10^6 bep). 97

Tabla 3.15. Intensidad energética directa con PIH (bep/10^3 $ de 2007) 97
Tabla 3.16. Intensidad energética total con PIH (bep/10^3 $ de 2007). 97
Tabla 3.17. Escenarios de intensidad energética (bep/10^3 $ de 2007) 97
Tabla 3.18. Matriz insumo-producto (€). MH (2014) 101
Tabla 3.19. Matriz de precios unitarios. MH (2014) 101
Tabla 3.20. Matriz de flujos físicos con PINH. MH (2014) 101
Tabla 3.21. Cuentas satélite (kg). MH (2014) 101
Tabla 3.22. Intensidad ecológica (kg/€). MH (2014) 103
Tabla 3.23. Matriz de flujos físicos con PINH. MH (2014) 103
Tabla 3.24. Matriz insumo-producto y cambio en f_2^1(€). MH (2014) 103
Tabla 3.25. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1. MH (2014) 105
Tabla 3.26. Cuentas satélite con PINH y cambio en f_2^1(kg). MH (2014). 105
Tabla 3.27. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1, sin cumplir la condición de conservación. MH (2014) 105
Tabla 3.28. Intensidad ecológica con PINH y cambio en f_2^1, sin cumplir la condición de conservación. MH (2014). 105
Tabla 3.29. Oferta ajustada con PINH y cambio en f_2^1. MH (2014) 107
Tabla 3.30. Cuentas satélite con PINH y cambio en f_2^1. MH (2014). 107
Tabla 3.31. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1, que cumple la condición de conservación. MH (2014) 107
Tabla 3.32. Intensidad ecológica con PINH y cambio en f_2^1, que cumple la condición de conservación. MH (2014) 107
Tabla 3.33. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1 completa, que cumple la condición de conservación. MH (2014) 109
Tabla 3.34. Oferta y PIH. MH (2014). 109
Tabla 3.35. Matriz de flujos físicos con PIH. MH (2014). 109
Tabla 3.36. Matriz de flujos físicos con PIH completa. MH (2014) 111
Tabla 3.37. Matriz de flujos físicos con PIH y cambio en f_2^1. MH (2014) 111
Tabla 3.38. Coeficientes técnicos de los flujos ecológicos con PIH y cambio en f_2^1. MH (2014) 111
Tabla 3.39. Cuentas satélite con PIH y cambio en f_2^1. MH (2014) 112
Tabla 3.40. Matriz de flujos físicos con PIH y cambio en f_2^1, que cumple con la regla de conservación. MH (2014). 112
Tabla 4.1. Rendimiento (pérdida) energético (a) total en la transformación. MUH con RECE. 128
Tabla 4.2. Rendimiento (pérdida) energético (a) directo en la transformación. MUH con RECE. 128
Tabla 4.3. Rendimiento (pérdida) energético (a) total en la transformación. MUH con REDE 128
Tabla 5.1. Clasificación intersectorial por encadenamientos directos. 148
Tabla 5.2. Interpretación de los encadenamientos directos 148
Tabla 5.3. Clasificación sectorial según los tipos de encadenamientos y la homogeneidad en los coeficientes técnicos 151
Tabla 5.4. Descripción de sectores según tipos de encadenamientos y grados de homogeneidad 153

Abreviaturas

APM	Agro, pesca y minería
BCE	Banco Central del Ecuador
bep	barriles equivalentes de petróleo
C	Construcción
C y otros	Construcción y otros
CA	Caña de azúcar
CED	Coeficiente energético directo
CET	Coeficiente energético total
CF	Consumo final
CI	Consumo intermedio
CO2	Dióxido de carbono
Com., serv., público	Comercial, servicios y público
CPCN	Clasificación de Productos de Cuentas Nacionales
CSP	Comercio, servicios y sector público
D	Diésel
E	Emisiones
ECO2	Emisiones de CO2
ELEC	Electricidad
FO	*Fuel oil*
GA	Gasolina y alcoholes
GEI	Gases de efecto invernadero
GN	Gas natural
GLP	Gas licuado y otros
HE	Hidroenergía
HeD	Heterogéneos en la demanda
HeO	Heterogéneos en la oferta
Het	Heterogéneos en la oferta y en la demanda
HoD	Homogéneos en la demanda
HoO	Homogéneos en la oferta
Hom	Homogéneos en la oferta y en la demanda
ID	Impulsores de demanda
IECO	Intensidad de emisiones

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IND	Industria
Ind	Independientes
Ind.	Industrial
IO	Impulsores de la oferta
IS	Insumos satélite
J	*joules*
Kbep	miles de barriles equivalentes de petróleo
Kg	kilogramo
KJ	Kerosene y *jet fuel*
Kton	kilotonelada
L	Leña
Mbep	millones de barriles de equivalentes de petróleo
Me	Mediana
MEI	Método de la energía incorporada
MIOT	Monetary Input-Output Table
MJ	Mega joules
MH (2014)	Merciai y Heijungs (2014)
MPI	Método de precios implícitos
MPINH	Modelo de precios implícitos no homogéneos
MUH	Método de unidades híbridas
MuSIASEM	Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism
NE	No energéticos
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
OS	Otras fuentes secundarias
OT	Oferta total
P	Petróleo
PIH	Precios implícitos homogéneos
PINH	Precios implícitos no homogéneos
PIOT	Physical Input-Output Table
RECE	Retornos energéticos constantes de escala
REDE	Retornos energéticos decrecientes de escala
Serv. y comercio	Servicios y comercio
TA	Transporte y almacenamiento
tep	tonelada equivalente de petróleo
TJ	*terajoules*
Trans.	Transporte
UHRC	Unidades híbridas con retornos energéticos constantes
UHRD	Unidades híbridas con retornos energéticos decrecientes

Prefacio

En este libro retomo mi interés por el uso de herramientas de cuentas ambientales para entender las causas económicas, sociales y biofísicas de la degradación ambiental. Hace 15 años inicié con las cuentas y balances de flujos de materiales para la economía ecuatoriana con énfasis en su posición de desventaja dentro del comercio mundial, que configuraba condiciones de intercambio económica y ecológicamente desigual; posteriormente analicé otras economías andinas dentro de ese mismo contexto. En esta ocasión, el intercambio intersectorial de insumos y productos energéticos sirve como herramienta para estudiar el metabolismo de las sociedades. Se trata de un nivel mucho más desagregado de evaluación, que refleja mejor las transacciones que realizan los agentes y su impacto en términos del sistema del que dependen. Lo más interesante está por venir, porque a partir de los métodos que estudio en este libro construiré una base conceptual y analítica de información para el caso ecuatoriano. Esta servirá de guía para replicar este análisis con otras economías latinoamericanas. Considero que las posibles derivaciones de este trabajo son múltiples.

Probablemente una de las líneas más interesantes será el desarrollo de modelos de redes ecológicas, los cuales han sido aplicados principalmente para estudiar el caso chino, pero son fundamentales para entender la importancia de la transición que estamos en obligación de promover como seres humanos, como economías y como planeta. Desde estos modelos se apela a la comprensión de los sistemas sociales como comunidades de organismos vivos que interactúan y afectan a su medio físico. Es decir, comunidades que dependen de su ecosistema para funcionar. En ese contexto, este libro aporta con una dimensión de ese enfoque de análisis, el estudio de las interacciones entre los elementos del sistema. Los mecanismos de organización comunitaria y su forma de afectar a su entorno serán piezas fundamentales para entender los engranajes del sistema. En otros términos, considero que la organización comunitaria puede desempeñar un rol esencial en la definición de las transacciones y, por ende, en los impactos que estas transacciones pueden tener en la naturaleza. Estos dos aspectos no han sido abordados en los modelos de redes ecológicas existentes y son discusiones urgentes en economías como la ecuatoriana, fuertemente dependiente del extractivismo.

La última parte de este libro la escribí en medio de una situación extremadamente difícil a escala global, una pandemia que se traduce, a su vez, en diversas crisis en lo social, en

lo económico, en lo ambiental e incluso en lo ético. La actividad económica en el mundo se encuentra casi por completo paralizada, al igual que la vida familiar y social, porque un virus de expansión muy acelerada acecha en cada rincón, parecería respirar en la nuca a todo el que sale de su casa, o se alista para ingresar a los domicilios al mínimo descuido.

Una de las más importantes lecciones que están aprendiendo o deberían aprender los gobiernos es el cuidado de los sistemas de salud, cuyo fortalecimiento debe ser permanente en todo sentido. El Ecuador es uno de los países más golpeados por el coronavirus y se ha convertido en un vergonzoso ejemplo latinoamericano del estado de descalabro de un sistema de salud que deja indefensa a toda la población. Las noticias alarmantes de un manejo caótico, improvisado y hasta marcado por la corrupción durante esta emergencia acompañan a la tristeza por las pérdidas humanas. Un panorama nada alentador cuando cada día suben las cifras de contagios y decesos a un ritmo galopante si se contrasta con el tamaño de la población total del país.

Una situación tan extrema tiene, sin embargo, otras facetas. Una de ellas es la solidaridad de la población sensibilizada por el padecimiento de los afectados, en muchas ocasiones golpeados más de una vez por la pérdida de familiares o amigos muy cercanos. Otra faceta es replantear los patrones de consumo, ahora limitados, no solo porque la disponibilidad ya no es inmediata, sino también porque el racionamiento se vuelve cada vez más frecuente. Las prioridades son, por lo pronto, distintas.

El tema ambiental se encuentra también en el trasfondo de la crisis, así como en el de la recuperación. Los procesos de transición socioenergética son urgentes. La paralización forzosa en todo el mundo, debido a esta pandemia, tiene un significado profundo desde la lectura social y ambiental. Los límites del planeta son ahora más claros que nunca y es evidente la necesidad de un cambio en los paradigmas para afrontar la catástrofe en curso. Espero que la presentación de este estudio de la economía ecuatoriana, y en particular de su sistema energético, sirva para encontrar algunas luces en los nuevos caminos que todos, como sociedad, tenemos que aprender a recorrer. Espero que el despertar de esta catástrofe sea en un mundo distinto y con renovado ánimo de transitar por un camino respetuoso de los congéneres, de la naturaleza y también de las futuras generaciones.

Introducción

La importancia de estudiar el comportamiento físico de la economía ha sido analizada desde el concepto de metabolismo social. Tal noción fue introducida formalmente en los años noventa como el estudio de la relación de dependencia que mantienen los sistemas sociales, y en particular el sistema económico, respecto de la naturaleza (Fischer-Kowalski 1998; Fischer-Kowalski y Hüttler 1998). Esta dependencia ocurre porque las actividades económicas tienen lugar gracias al intercambio de materia y energía con la naturaleza. Se trata de recursos naturales y servicios ecológicos que sirven de insumos para el funcionamiento del sistema económico, y que luego de procesarse son devueltos a la biósfera como residuos. Esta descripción de los intercambios socialmente organizados entre la economía y la biósfera ha sido denominada metabolismo social, al hacer una analogía entre el funcionamiento de un organismo vivo y los sistemas sociales.

La construcción de cuentas ambientales biofísicas en la región latinoamericana es relativamente reciente. Siguiendo las metodologías estandarizadas de la European Commission y la Eurostat (2001), se han explorado flujos de materiales en Chile (Giljum 2004); México (González-Martínez, Citlalic y Schandl 2008); Ecuador (Vallejo 2010); Colombia (Vallejo, Pérez-Rincón y Martínez-Alier 2011), y Argentina (Pérez-Manrique et al. 2013). También se han realizado estudios regionales comparativos que retoman y/o actualizan trabajos previos e integran cuentas de materiales de Brasil (Eisenmenger, Ramos-Martín y Schandl 2007); Perú (Russi et al. 2008; Vallejo 2015); Bolivia (Pérez-Rincón, Vargas-Morales y Crespo-Marín 2018); Venezuela (Eisenmenger, Ramos-Martín y Schandl 2007; Crespo-Marín y Pérez-Rincón 2019) y del resto de América Latina (West y Schandl 2013). Los recursos energéticos también han sido analizados en Argentina (Recalde y Ramos-Martín 2012) y, comparativamente, en Brasil, Chile y Venezuela (Eisenmenger, Ramos-Martín y Schandl 2007).

Es importante distinguir entre métodos estandarizados y no estandarizados para estudiar el metabolismo social porque resolver este dilema, al decantarse por un método específico, tendrá implicaciones importantes desde un punto de vista analítico y comparativo. Los métodos estandarizados, como la contabilidad de flujos de materiales, tienen "la gran virtud de identificar [desde indicadores biofísicos agregados] las grandes tendencias históricas y geográficas en el uso de recursos" (Infante-Amate, González de

Molina y Toledo 2017, 136) o, de manera general, la dependencia biofísica de las sociedades (European Commission y Eurostat 2001); y al estar homologados, los resultados pueden compararse entre distintos estudios. No obstante, precisamente por su nivel agregado, se simplifica la información disponible sin ofrecer una cuantificación biofísica de las interrelaciones en el interior del sistema sociometabólico y, por lo tanto, se limita el desarrollo de análisis complejos (Giampietro 2006; Infante-Amate, González de Molina y Toledo 2017). Aunque este método puede adaptarse a la escala de análisis que se requiera, una restricción es que solamente puede emplearse una escala de análisis a la vez (Kissinger y Rees 2010). Generalmente se usa toneladas de materiales o *joules* de energía, lo que anula la dimensión cualitativa de los flujos e impide vincularlos con impactos ambientales específicos.

Estos problemas se resuelven parcialmente desde propuestas como el Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM) (Giampietro y Mayumi 2000; Gerber y Scheidel 2018). MuSIASEM integra el modelo de flujos y fondos planteado por Georgescu-Roegen (1971), de acuerdo con el cual, además del intercambio biofísico de flujos (aquellos que cambian durante el periodo de análisis), se estudian las estructuras del sistema o fondos (que preservan su identidad durante el análisis), y se analizan interacciones entre diversas variables en múltiples escalas. Sus principales desventajas, no obstante, son la enorme demanda de información para construir el modelo y la difícil comparabilidad de sus resultados porque los supuestos empleados pueden diferir mucho entre investigaciones similares.

En esta propuesta busco abordar una vía distinta para el estudio del metabolismo social en la región. Se trata de los enfoques insumo-producto para construir cuentas ambientales en términos físicos. La limitada disponibilidad de información ha hecho que estos análisis, que datan de los años sesenta y setenta, sean puntuales en la región.

Para el caso ecuatoriano explico la aplicación de tres métodos de construcción de matrices insumo-producto de la energía, que se pueden originar tanto en información propiamente energética como derivarse de forma indirecta a partir de información económica, o incluso combinar estas dos dimensiones dentro de un solo marco de análisis. Me concentro en el estudio de la energía, sin embargo, a partir de la misma estructura y con la información de base apropiada, se puede extender este mismo formato de análisis para otras unidades físicas, tales como materiales, recursos hídricos o, incluso, contaminación. Me enfoco en el caso de la energía porque la base analítica de las tablas insumo-producto son los intercambios intersectoriales de recursos. Esa información está detallada en los balances energéticos nacionales, algo que no ocurre con otros recursos. Con materiales, por ejemplo, se puede disponer de un balance físico, pero este no detalla intercambios intersectoriales, sino que se calcula de forma agregada para la economía.

Puesto que mi propósito es emprender un recorrido por distintos métodos, para entender detalladamente cómo se construyen y cómo se interpretan, me pregunto si son comparables los resultados cuando el punto de partida es una matriz monetaria respecto del caso en que se desarrolla el análisis sobre la base de intercambios físicos. Existe un debate con el cual se busca promover el uso de métodos híbridos que conserven las unidades

de medida propias de cada flujo antes que una transformación a intensidades ecológicas que operan a través de precios, porque estas conversiones son el origen de inconsistencias. Demostraré que los resultados de estos ejercicios ciertamente difieren entre distintos métodos, pero no necesariamente son inconsistentes con el principio termodinámico de la conservación de la materia y la energía porque muestran realidades diferentes.

Me interesa, además, verificar las especificidades que caracterizan a un análisis que se desarrolla en las economías latinoamericanas. Argumento que tanto el ámbito social como el ambiental quedan invisibilizados en la contabilidad del crecimiento económico tradicional, que ignora los conflictos socioecológicos y la creciente pérdida de biodiversidad, funciones ecológicas y recursos naturales, que en algunos casos son irreparables.

Aparte, la escala de consumo de recursos materiales o energéticos de los territorios latinoamericanos es significativamente inferior a la que caracteriza al Norte global. Con base en los datos de la IEA (2019), se conoce que el consumo final de energía para la región de Centro y Sudamérica en 2017 fue de 0,94 toneladas equivalentes de petróleo (tep), en términos per cápita, muy inferior al consumo de la Unión Europea que alcanzó 2,27 tep per cápita en el mismo año. Las implicaciones de este consumo se pueden analizar, por ejemplo, en términos de emisiones de CO_2. De esta forma, se conoce que las emisiones per cápita en Centro y Sudamérica fueron de 2,2 toneladas de CO_2, mientras que las de la Unión Europea fueron de 6,3 toneladas. No obstante, cuestiono la relevancia de centrar el análisis latinoamericano en las emisiones de CO_2 que se derivan de sus actividades económicas, pues aunque se trata de un problema de carácter global cada vez más significativo y con secuelas cada vez más extendidas en el propio territorio sudamericano (como sucedió con los incendios masivos en la Amazonía) o en Australia, a inicios de 2020, el cambio climático se origina principalmente en los patrones y la escala de consumo del Norte antes que en las trayectorias de uso que caracterizan a las economías del Sur.

En esta región parece más significativo identificar características estructurales y funcionales de los intercambios de recursos que realizan las economías, a fin de establecer los sectores o actividades económicas que cumplen un rol ecológico fundamental para la sostenibilidad del ecosistema social que analizo. En ese contexto, distinguir qué fuentes energéticas sustentan estas economías, qué trayectorias y qué implicaciones tiene la dependencia respecto de la explotación de fuentes renovables y no renovables de recursos son preguntas que se adhieren mejor a los cuestionamientos que sustentan los movimientos de justicia ecológica. Estos grupos no solamente reclaman la responsabilidad del Norte por la deuda ecológica histórica con el Sur, sino que también buscan incidir en la política pública para revertir la tendencia actual por reprimarizar las economías de la región para satisfacer las necesidades de materia prima barata de exportación, la cual ocasiona altos costos socioecológicos.

Abordar el análisis de los intercambios que tienen lugar en el sistema económico desde su dimensión física es importante para evidenciar los lenguajes de valoración (Martínez-Alier 2005) distintos al crecimiento económico, y en este contexto fundamental para abonar a estas reivindicaciones. En efecto, superar la obstinación por las cuentas del crecimiento económico supone reconocer que

> en un conflicto ambiental se despliegan valores muy distintos, ecológicos, culturales, valores que se basan en el derecho a la subsistencia de las poblaciones, y también valores económicos en el sentido crematístico. Son valores que se expresan en distintas escalas, no son conmensurables (Martínez-Alier 2007, 150).

Desde estos elementos he estructurado este libro en cinco capítulos. El primero de ellos tiene como base el modelo propuesto por Alcántara y Roca (1995), que permite desarrollar una matriz insumo-producto energética basada en los intercambios que tienen lugar por el proceso de transformación de las fuentes primarias en fuentes secundarias. Este método ha sido aplicado en el caso del Ecuador, durante el año 2013, por Buenaño (2017) en un estudio que se centra en la cuantificación de las emisiones de CO_2 sobre la base de herramientas insumo-producto. Mi principal objetivo es explicar la aplicación del método, sus fortalezas y sus puntos débiles, e interpretar sus resultados para el caso ecuatoriano. De esta forma, afino algunos supuestos de partida que a mi criterio se ajustan mejor a la realidad nacional, y replico los resultados de Buenaño en la fase de construcción de la matriz de flujos energéticos. El resultado principal de estas estimaciones son los requerimientos energéticos que se obtienen a partir del procedimiento que denomino método de la energía incorporada (MEI).

En el segundo capítulo explico cómo se desarrolla el método de unidades híbridas (MUH), cuyo fundamento es el empleo de las propias unidades de medida para cada uno de los flujos que analizo De esta manera, en esta aplicación combino las unidades energéticas con las unidades monetarias para cuantificar los requerimientos energéticos del sistema. Esta forma de estimación, a mi criterio, evidencia de mejor forma las características del sistema económico y de transformación energética, más aún cuando se reconoce que el sistema puede mostrar retornos energéticos decrecientes en la conversión de energía, es decir, que una parte de la energía primaria invertida no se transforma en energía secundaria, sino que se disipa.

En el tercer capítulo expongo el tercer método de construcción de matrices insumo-producto energéticas: el método de precios implícitos (MPI). Este es el método más ampliamente utilizado en los modelos que desarrollan este tipo de análisis, sin embargo, también es el más controversial. Su utilización ha sido extensamente criticada principalmente por el supuesto de precios homogéneos para las interrelaciones entre productores y consumidores de las fuentes de energía (Chapman 1974; Dietzenbacher et al. 2009, Mattey y Ten Raa 1997, Merciai y Heijungs 2014, Miller y Blair 2009, Weisz y Duchin 2006, Wright 1974). Por esta razón, exploro dos variantes del modelo a fin de entender las limitaciones señaladas en la literatura especializada. Mi conclusión al respecto es que los precios homogéneos no son fuente de inconsistencia termodinámica, sino que los resultados que se obtienen de estos modelos permiten analizar solamente la dimensión económica de los intercambios. Cuando la finalidad de la investigación se centra en la dimensión física, o como en este caso en la dimensión energética, será necesario construir un modelo basado en precios no homogéneos, cuyas condiciones de balance se aplican desde los mismos principios de conservación, pero tienen diferente magnitud que las condiciones que se aplican a los modelos de precios homogéneos.

En el cuarto capítulo muestro la aplicación de los tres métodos anteriores al caso ecuatoriano durante el periodo comprendido entre 2010 y 2016. A partir de este desarrollo, puedo definir dos elementos importantes en el estudio de matrices insumo-producto en unidades físicas.

En primer lugar, que los requerimientos energéticos que se estiman desde distintas metodologías tienen un fundamento que los diferencia significativamente. En el caso del método de la energía incorporada, el fundamento del cálculo es la selección de los sectores por evaluar que componen una submatriz de intercambios económicos entre sectores energéticos. En el caso del método de unidades híbridas, la diferencia en los requerimientos energéticos resultantes se define por el uso de distintas unidades de medida que son apropiadas para los diversos flujos que se intercambian dentro del sistema. Finalmente, en el caso de los precios implícitos, precisamente la definición de tales precios delimita el tipo de análisis que es posible desarrollar. En segundo lugar, propongo que el grado de agregación de la información no es un elemento trivial para definir los resultados. Tomo los mismos datos de base para desarrollar los distintos métodos, con niveles de desagregación diferentes, y verifico sesgos significativos asociados al procedimiento con información agregada tanto en la escala de uso de los recursos energéticos como en su composición.

Por último, el capítulo quinto lo dedico al estudio de los encadenamientos productivos y la categorización sectorial de acuerdo con estos indicadores de enlace interindustrial. Existen varias utilidades importantes de las matrices insumo-producto y, en particular, de las físicas. Una de ellas, posiblemente la aplicación básica, es el cálculo de encadenamientos productivos. A partir de sencillos indicadores de conexiones intersectoriales se pueden categorizar las actividades por su grado de dependencia o contribución al sistema económico. Me interesa categorizar a los sectores que intercambian en el sistema energético del Ecuador. Desarrollo este análisis desde la premisa de que una economía pequeña y altamente especializada en la producción y exportación de un reducido grupo de productos reflejará esta estructura también en su sistema energético. La rigidez de una estructura altamente dependiente del sector petrolero será también un aspecto que considero no se resuelve en el ámbito económico y tampoco en el energético, a pesar de los recientes esfuerzos por diversificar la matriz energética a través del desarrollo hidroeléctrico.

Capítulo 1
Matriz insumo-producto física desde el modelo de energía primaria incorporada

En este capítulo inicio un recorrido que haré a lo largo de este libro por diferentes métodos que se aplican en la literatura para construir matrices insumo-producto en unidades físicas. Por ahora, me centraré en construir una matriz de intercambios intersectoriales desde las cifras de transformación de la energía. Esta descripción sirve de base para estudiar la capacidad explicativa de otros procedimientos con los que se busca traducir la información monetaria a unidades físicas al asumir una estructura de precios específica. A estos métodos se los conoce como métodos de precios implícitos o de intensidad energética si se emplea la relación inversa.

El capítulo se compone de cuatro secciones. En la primera reviso el estado del arte, en el cual se evidencia una escasa aplicación de estos métodos en las economías latinoamericanas. Este es un problema que se deriva de la dificultad que puede revestir la disponibilidad de los datos necesarios. Precisamente analizo este aspecto en la segunda sección del capítulo. En la tercera parte explico el método de energía primaria incorporada para construir una matriz insumo-producto de la energía. Con ese propósito, desarrollo un modelo simplificado para la economía ecuatoriana en el año 2016. Se trata de un modelo simplificado porque se agrega la información para facilitar la presentación de cálculos y resultados, de manera que solamente se analiza un sistema con seis sectores. En la última parte del capítulo presento los comentarios finales.

Marco conceptual y revisión del estado del arte

En el origen del análisis insumo-producto en términos físicos se encuentra el estudio de la energía que en plena crisis internacional del petróleo, durante los años setenta, fue el centro de atención porque se hacía necesario entender su rol en el sistema económico. También el reconocimiento progresivo de la crisis climática ha sido otro puntal para desarrollar investigaciones, sobre la base de los intercambios energéticos, en las que se describen otras dimensiones de los problemas ambientales, tales como la contaminación o la presión ambiental del sistema económico, que se miden a partir de los diversos flujos de materiales.

La forma básica de los modelos de precios implícitos que se han empleado profusamente en este tipo de investigaciones supone la incorporación de un conjunto de coeficientes energéticos lineales que definen el uso de energía por cada dólar de la producción de los sectores industriales (Miller y Blair 2009). De hecho, esta misma aproximación podría aplicarse a cualquier vector de coeficientes sectoriales que se estudie, como lo explicaré en el tercer capítulo (Alcántara y Roca 1995; Alcántara 2007; Imori y Guilhoto 2010; Piaggio 2013; Duarte, Sánchez-Chóliz y Bielsa 2002; Bicknell et al. 1998; Ferng 2001). Asimismo, en el siguiente capítulo analizaré en detalle las limitaciones que este enfoque reviste.

De forma general, un modelo insumo-producto de energía permite describir la cantidad total de energía que se necesita para que un producto pueda destinarse al consumo final. Para ello, se cuantifica tanto la energía consumida de forma directa durante el proceso productivo de una industria como la energía indirectamente incorporada en los insumos industriales que se requieren para el procesamiento (Miller y Blair 2009).

En este capítulo estudiaré una variante de estos modelos, que corresponde al método que identifico por el cálculo de la energía primaria incorporada. Aunque este último tiene como parte de su base analítica los precios implícitos, su primera ventaja es que permite descomponer el consumo energético en la energía primaria de diferentes fuentes que es necesaria para poder disponer de una unidad de energía para el consumo final (Alcántara y Roca 1995). Esto difiere del enfoque tradicional que se emplea en los métodos de intensidad energética, que es la medida inversa de los precios implícitos, en los cuales se distribuye la demanda energética en términos del consumo final, sin distinguir la necesidad de fuentes primarias para disponer de la energía que se utiliza.

Para entender la importancia del enfoque de energía primaria incorporada se puede usar como ejemplo la electricidad. La generación de cada unidad de energía eléctrica, que se puede medir en miles de barriles equivalentes de petróleo (Kbep) por ejemplo, requiere mucho más que una sola unidad de energía primaria para estar disponible. Esto sucede no solo porque las propias plantas de generación emplean energía para el proceso de transformación, sino también porque el procesamiento y la distribución pueden implicar "pérdidas", pues parte de la energía se disipa en la forma de calor. En definitiva, con este método se reconoce que la energía disponible requiere a su vez de una inversión inicial de energía primaria que en función del tipo de procesamiento que se lleve a cabo puede ser mayor. Por ejemplo, la quema de combustibles fósiles en las centrales térmicas puede suponer una mayor disipación.

Una segunda ventaja de este método, que a mi criterio es fundamental para el desarrollo de una matriz de interacciones energéticas sectoriales en unidades físicas, es la construcción de la matriz de entradas y salidas de energía a partir del análisis del proceso de transformación de la energía.

Además de la aplicación del método Alcántara y Roca (1995, 2004) en la economía española, este ha sido empleado por Ferng (2001, 2002) para realizar estimaciones del consumo en Taiwán, y el estudio más cercano corresponde al caso ecuatoriano, para el año 2013, aplicado en el trabajo de Buenaño (2017).

Fuentes de datos y preparación de la información

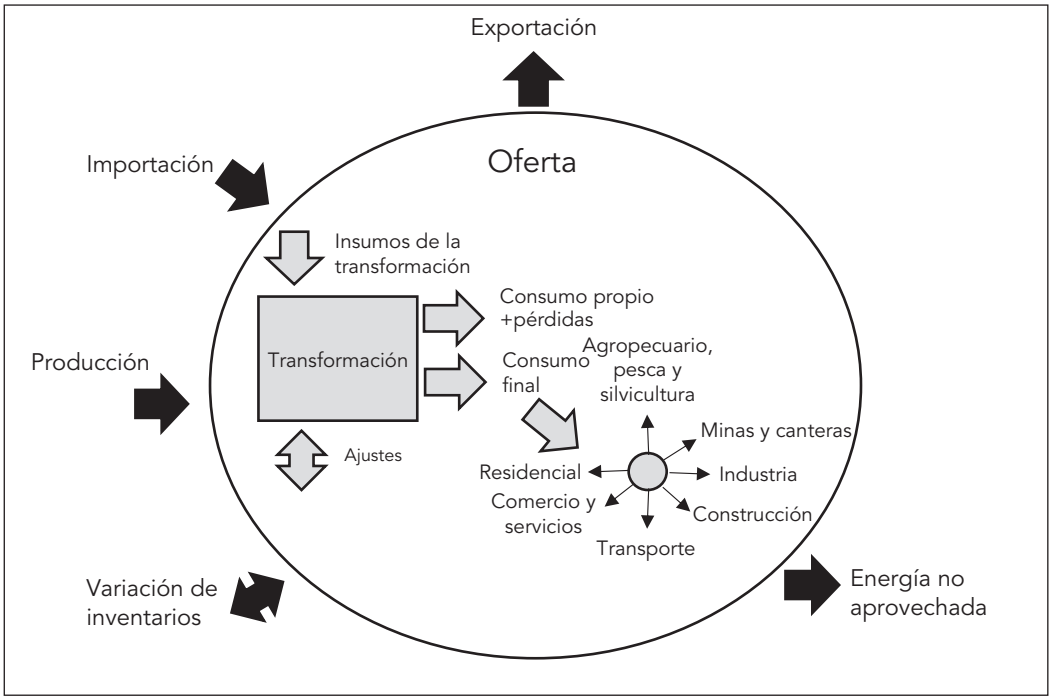
A lo largo del texto combinaremos información energética que se medirá en unidades físicas, generalmente barriles equivalentes de petróleo, con información económica medida en dólares. La información en unidades físicas se distinguirá a partir de un supraíndice **P**, mientras que en la económica no agregaré supraíndices.

Asimismo, emplearé a lo largo del texto la notación matricial habitual con negrillas. Las matrices se indicarán con letras mayúsculas (como **A**), los vectores columna con minúsculas (como **x**) y los vectores fila usualmente corresponderán a vectores columna transpuestos (como **x**'). Un vector que se transforma en una matriz diagonal se notará como $\hat{\mathbf{x}}$. Dos subíndices indicarán la ubicación de un elemento de una matriz (como $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{ij}]$); y, un solo subíndice, el elemento de un vector (como $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_j]$).

Aclarados estos detalles de notación, retomo la explicación de la información de base. La matriz de entradas y salidas de flujos de energía primarios y secundarios se construye a partir de los datos anuales del balance energético publicado por la OLADE (2020) para el Ecuador. Esta información se reporta tanto en unidades físicas específicas para cada energético, así como también en flujos calóricos. En este caso se usarán barriles equivalentes de petróleo (bep). Este último formato lo emplearé para este estudio.

En un balance energético se pueden identificar tres tipos de actividades, cuyos flujos de intercambio se detallan para fuentes primarias y secundarias de energía. Estas tres actividades comprenden: 1) las que corresponden a la oferta, 2) a la transformación y

Gráfico 1.1. Lecturas del balance energético



Fuente: OLADE (2017).

3) al consumo final. Los flujos de recursos vinculados a estas secciones mantienen relaciones de equilibrio en las diversas fases en las que se procesa la energía, es decir, en la producción, la transformación, el consumo interno y el intercambio con el exterior. Para construir un balance energético se toma como unidad de análisis a un país o a una región, y para un período específico, generalmente de un año. Considero al Ecuador como unidad de análisis y en este capítulo presento los resultados para el año 2016. En el último capítulo ampliaré el período de estudio a los años comprendidos entre 2010 y 2016.

En el gráfico 1.1 presento dos posibles lecturas del balance energético. La primera que describo corresponde a la disponibilidad de recursos del sistema, y la segunda, a los flujos asociados a la transformación y el uso de las fuentes de energía.

Desde la lectura de la disponibilidad se detalla actividades de oferta, es decir, la cantidad de energía que se halla disponible dentro del país, "ya sea para su consumo final directo o para su transformación en otras fuentes de energía" (OLADE 2017, 30). La oferta total de energía, expresada en términos de vectores columna, se obtiene así:

$$\mathbf{x}^P = \mathbf{p}^P + \mathbf{ri}^P - \mathbf{re}^P + \mathbf{vi}^P - \mathbf{na}^P$$

Donde:

$\mathbf{x}^P$	Oferta total	La cantidad de energía disponible en el interior de un país.
$\mathbf{p}^P$	Producción	Para las fuentes primarias se cuenta toda energía primaria extraída, explotada, cosechada o aprovechada en el territorio nacional. Para las fuentes secundarias se cuentan todas las salidas de los centros de transformación o los productos finales de la transformación, que son aquellos que están disponibles para ser entregados tanto a los consumidores finales como a otros centros de transformación.
$\mathbf{ri}^P$	Importación	Todas las fuentes energéticas primarias y secundarias originadas fuera de las fronteras para formar parte de la oferta total.
$\mathbf{re}^P$	Exportación	Fuentes energéticas primarias y secundarias que salen de los límites territoriales de un país, por lo tanto, no están destinadas al abastecimiento de la demanda interna.
$\mathbf{vi}^P$	Variación de inventarios	Diferencia entre las existencias iniciales y las finales respecto al período del balance en las instalaciones de almacenamiento de los diferentes productos. Este concepto no se aplica para la electricidad ni para algunas fuentes renovables intangibles como la energía eólica, la solar y la geotermia. Para el caso de la hidroenergía, se considera como variación de inventarios la variación del volumen de agua almacenada en los embalses.
$\mathbf{na}^P$	Energía no aprovechada	La cantidad de fuentes de energía registrada en la producción, pero que por indisponibilidad técnica y/o económica no es posible su utilización.

Desde la lectura de las actividades de transformación se identifican

> los procesos en que las fuentes energéticas tanto primarias como secundarias, se modifican en instalaciones llamadas centros de transformación; donde se producen cambios físicos o químicos a dichas fuentes, obteniéndose como resultados productos con propiedades que facilitan su aprovechamiento energético (OLADE 2017, 37).

Los procesos de transformación que se realizan en el Ecuador comprenden las siguientes categorías: refinerías, centros de tratamiento de gas natural, centrales eléctricas (públicas y autoproductoras) y destilerías de etanol. En otras economías se pueden identificar actividades en coquerías y altos hornos, carboneras, plantas de biodiésel y otros centros de transformación.

Para construir la matriz de entradas y salidas, se distribuyen los insumos primarios y secundarios entre las energías secundarias indicadas, conforme el coeficiente técnico que se obtiene de los productos energéticos finales –que se conocen también como flujos de salida de la transformación– en los diferentes centros de transformación. De esta manera, se emplea un supuesto similar al que corresponde a las matrices insumo-producto monetarias, por el cual la cantidad de producción está estrechamente vinculada con la cantidad de insumos empleados para generar la producción en una relación de retornos constantes de escala; es decir, que el uso de insumos sufre cambios proporcionales a los cambios en la producción.

En la tabla 1.1 expongo los resultados de este proceso, que se efectúa de manera similar para el resto de las actividades de transformación. Se conoce que, en 2016, los centros de procesamiento de gas utilizaron 1868 Kbep de gas natural como insumo para la producción de 1669 Kbep de gas licuado, gasolina y otros gases. ¿Cuánto gas natural se utilizó para generar estos productos? Distribuyo el uso de este insumo conforme la proporción de productos generados en los centros de gas. Por el balance energético se conoce que la producción de los centros de gas, en 2016, fue de 793 Kbep de gas licuado, 599 Kbep de gasolinas y alcoholes, y 277 Kbep de otros gases. Esto significa que de un total de 1868 Kbep de gas natural empleado en los centros de gas se puede calcular la proporción utilizada para la producción con base en estas cifras: 48 % del gas natural para gas licuado, 36 % para gasolinas y alcoholes y 16 % para otros gases.

Tabla 1.1. Transformación en centros de gas (10^3 bep)

Fuentes de energía	Productos	Proporción de uso del insumo energético	Insumos
			Gas natural
Total	**1 669**	**1,0000**	**1 868**
Gas licuado	793	0,4752	888
Gasolina/alcohol	599	0,3590	671
Otros gases	277	0,1658	310

Fuente: Balance energético (OLADE 2016).

Desde esta perspectiva de los flujos de transformación, otra forma de definir la oferta total de energía, nuevamente en términos de vectores columna, es al sumar el consumo final $\mathbf{f}^P$ de la siguiente forma:

$$\mathbf{x}^P = \mathbf{it}^P + \mathbf{cp}^P + \mathbf{aj}^P + \mathbf{f}^P$$

$\mathbf{it}^P$	Insumos de la transformación	Las cantidades de energía que ingresan al centro de transformación para ser procesadas física y/o químicamente.
$\mathbf{cp}^P$	Consumo propio (+ pérdidas)	El consumo propio son las cantidades de productos empleados en el mismo centro de transformación para usos finales como calor para procesos e iluminación. Se excluye los combustibles empleados para generar electricidad. Las pérdidas muestran la cantidad de fuentes de energía que se pierde por diferentes razones en su paso por la cadena energética, desde su origen hasta su consumo final. Ocurren pérdidas en extracción, almacenamiento, transformación, transporte y distribución. Sin embargo, para efecto del balance energético no se consideran las pérdidas de extracción ni transformación para evitar su doble contabilización. A diferencia de la energía no aprovechada, las pérdidas son eventos inevitables o accidentales.
$\mathbf{aj}^P$	Ajuste estadístico	Esta cuenta acumula errores de medición, aproximaciones en la conversión de unidades, datos incompletos, etc.
$\mathbf{f}^P$	Consumo final	Toda la energía que se entrega a los sectores de consumo para su aprovechamiento como energía útil, como electricidad y calor. Se excluye de este concepto las fuentes utilizadas como insumo o materia prima para producir otros productos energéticos ya que esto corresponde a la actividad "transformación".

Fuente: OLADE (2017).

Se puede verificar una relación adicional para las fuentes secundarias de energía. Como he definido anteriormente ($\mathbf{p}^P$), la producción secundaria de energía corresponde a la sumatoria de los productos finales de la transformación (definidos con valores positivos), que se derivan de todos los centros de transformación **c** y se definen para cada fuente secundaria de energía **k**. Los productos finales de la transformación o salidas de la transformación de cada fuente secundaria ($\mathbf{st}_{kc}^{\ P}$) son aquellos que están disponibles para ser entregados tanto a los consumidores finales como a otros centros de transformación. A continuación, definimos la producción secundaria de energía:

$$\mathbf{p}_k^{\ P} = \sum_{\mathbf{c}} \mathbf{st}_{kc}^{\ P}$$

Ya he definido anteriormente el consumo final de energía ($\mathbf{f}^P$). Resta por indicar que analizaré los siguientes sectores: agropecuario, pesca y silvicultura; minas y canteras;

industrial manufacturero; construcción; transporte; comercial y servicios, y residencial. He agregado el sector no energético para registrar ese tipo de consumo, que también consta en el balance energético.

Método

Este ejercicio se basa en el método desarrollado por Alcántara y Roca (1995) y Gutiérrez et al. (2018), que fue empleado por Buenaño (2017) para el caso ecuatoriano con cifras de 2013. Identificaré como método de la energía primaria incorporada. En este caso realizo una adaptación de estos métodos, en la cual incorporo algunas categorías de recursos energéticos y no energéticos que hallo equiparables con las cuentas monetarias. La posibilidad de realizar un análisis paralelo entre las cuentas monetarias y las cuentas físicas será de vital importancia para contrastar los resultados de la aplicación de los métodos de construcción de matrices insumo-producto en unidades físicas que abordaré en los siguientes capítulos. Me interesa de este método la aplicación del concepto de energía primaria incorporada porque permite descomponer el consumo energético en aquella inversión energética inicial que requiere la producción de cualquier bien. En otras palabras, la cantidad de energía primaria que se requiere para disponer de una unidad de energía para el consumo final (Alcántara y Roca 1995).

El primer paso es construir una matriz de entradas y salidas de flujos de energía primarios y secundarios a partir de los datos anuales del balance energético, publicado por la OLADE (2016) para el Ecuador, en unidades calóricas, específicamente barriles equivalentes de petróleo. Para ese propósito usaré la lectura de la transformación que presenté anteriormente sobre la preparación de la información. Definiré dos versiones de esta matriz de entradas y salidas energéticas. La primera servirá de base para replicar el método propuesto por Alcántara, Padilla y Piaggio (2017), y la segunda, para los métodos híbridos que desarrollaré en los siguientes capítulos. La diferencia más notable entre estas dos matrices de flujos físicos es que en mi análisis incorporo el consumo final de energía de los diversos sectores económicos y del sector residencial en la matriz de entradas y salidas de energía, desde una contabilización que es consistente con la oferta total del balance energético. En cambio, Gutiérrez et al. (2018) identifican en su propuesta los flujos energéticos sectoriales a partir de un método propio de precios implícitos, que presentaré enseguida.

En la siguiente sección explicaré las condiciones generales para construir la matriz de entradas y salidas de energía, y a continuación los supuestos específicos aplicados a nuestra versión del método de Alcántara y Roca (1995); finalmente, los supuestos correspondientes a la matriz de flujos físicos para los modelos híbridos que presentaré en los siguientes capítulos.

Matriz de entradas y salidas de energía

Los elementos de esta matriz de entradas y salidas de la transformación tales que z_{ij}^{p}, $\mathbf{i=j}$ se componen de la suma del consumo propio que realiza cada sector energético para su funcionamiento más las pérdidas que tienen lugar a lo largo de la cadena energética sea por almacenamiento, transporte o distribución $\mathbf{cp}_i^{P}$.

Los elementos fuera de la diagonal z_{ij}^{p}, $\mathbf{i\neq j}$ corresponden a los insumos energéticos del proceso de transformación para cada fuente de energía it_{ij}^{p}, que se reportan en valores negativos en la sección de transformación dentro del balance energético. La distribución de estos insumos entre las fuentes secundarias se realiza desde coeficientes técnicos que se definen a partir del detalle de productos energéticos que se generan en cada tipo de centro de transformación.

Esta matriz requiere tres ajustes adicionales. El primero es la omisión de las fuentes energéticas (o no energéticas) que no presentan movimientos para la economía ecuatoriana, este es el caso del carbón mineral, la geotermia, la energía nuclear, el coque y el carbón vegetal.

El segundo ajuste requiere que sus categorías sean compatibles con las categorías de flujos económicos que se presentan en las tablas de utilización que publica el Banco Central del Ecuador (BCE). Algunas fuentes de energía no se identifican en la información económica. Adapto los datos de la tabla de utilización para cotejarlos con las cifras del balance energético, aunque es necesario advertir sus limitaciones.

En el caso de la leña pueden existir subregistros, porque una parte significativa del uso doméstico y comercial no suele contabilizarse en estadísticas oficiales y parece confirmarse una tendencia continuamente decreciente en el uso de este energético (Caicedo, Vallejo y Carrasco 2019). No obstante, existe una categoría que puede emplearse como *proxy* para este análisis, que corresponde a madera sin elaborar. Es preciso notar que Buenaño no contabiliza este sector.

La hidroenergía se computa como energía eléctrica, mientras que la electricidad se asigna como servicios de transmisión y distribución eléctrica. En este caso, una limitación importante es que no existe una correspondencia exacta entre estas cuentas monetarias y su análogo físico.

Buenaño (2017) explica que la categoría de servicios de transmisión y distribución eléctrica comprende el uso de energía eléctrica en calidad de insumo para llevar a cabo el proceso de distribución en la categoría denominada generación, captación y distribución de energía eléctrica. A fin de evitar una doble contabilización, Buenaño (2017) sugiere omitir el valor correspondiente porque la electricidad serviría como insumo de los servicios de transmisión y distribución eléctrica en lugar de constituir un consumo final. Argumento que al seguir este criterio, este mismo tratamiento podría aplicarse, por ejemplo, en la industria petrolera, en la cual el petróleo crudo sirve de "insumo" al sector extracción de petróleo crudo y gas natural, que no es propiamente un consumo final, sino que sirve de base para la producción de gasolinas y otros combustibles de esta industria. En mi criterio, las cifras que empleo en el análisis requieren describir los usos intermedios de los bienes y servicios que realizan las diferentes industrias en lugar de los consumos finales. Por esta razón, sugiero mantener los valores reportados en la tabla de utilización y no perder información. Considero que tiene sentido que las entradas de esta tabla representen insumos o usos intermedios antes que consumos finales.

Finalmente, otras fuentes primarias de energía como residuos o fuentes renovables no se reportan en la tabla de utilización. En consecuencia, en mi análisis excluyo la categoría de otras fuentes primarias. Además, agrego en una sola categoría el gas licuado de petróleo y otros gases porque en las cuentas económicas no se distingue entre estas fuentes. Es preciso notar que Buenaño tampoco contabiliza este sector.

El tercer elemento de ajuste comprende el denominado "factor de insumos materiales" (Weisz y Duchin 2006, 535), que representa el análogo biofísico del concepto económico de "valor agregado" y comprende los valores físicos de producción, tales como: materias primas, tierra, agua, energía (Duchin 2009, 30).

Por último, para lograr que la suma total por filas coincida con la suma total por columnas en aquellos sectores que al mismo tiempo son consumidores y proveedores de energía, agrego dos filas de balance. Por una parte, la contabilidad de los insumos satélite del sistema o el denominado factor de insumos materiales is_j^P, y por otra, los desperdicios w_j^P y/o emisiones e_j^P. Los insumos satélite del sistema se obtienen a partir de:

1. la producción primaria de energía,
2. las importaciones netas de las exportaciones,
3. la variación de inventarios ajustada por el consumo propio, que ya se cuenta en la matriz de transacciones energéticas y
4. la energía no aprovechada, que debe descontarse.

Asimismo, se calculan los rubros de emisiones y desperdicios como ítems de balanceo. Las diferencias positivas entre la oferta total y la disponibilidad neta de insumos serán asignadas como residuos o subproductos de los procesos de transformación. Las diferencias negativas, en cambio, constituirán emisiones. Explico detalladamente estas condiciones de balanceo en la siguiente sección. Por ahora, en la tabla 1.2 mostraré la estructura genérica de una matriz insumo-producto física, conforme esta composición:

Tabla 1.2. Estructura genérica de una matriz insumo-producto física

		Consumidores				Demanda final	Oferta total
		Sector 1	Sector 2	⋮	Sector n	f^P	x^P
Proveedores	Sector 1	z_{11}^P	z_{12}^P	⋮	z_{1n}^P	f_1^P	x_1^P
	Sector 2	z_{21}^P	z_{22}^P	⋮	z_{2n}^P	f_2^P	x_2^P
	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮	⋮	⋮
	Sector m	z_{m1}^P	z_{m2}^P	⋮	z_{mn}^P	f_m^P	x_m^P
Insumos satélite		is_1^P	is_2^P	⋮	is_n^P		
(+) Desperdicios		w_1^P	w_2^P	⋮	w_n^P		
(-) Emisiones		e_1^P	e_2^P	⋮	e_n^P		
Oferta total		x_1^P	x_2^P	⋮	x_n^P		

Fuente: OLADE (2017).

Hasta aquí la descripción de los puntos en común de las dos versiones de la matriz de entradas y salidas de energía que presento en este capítulo. En las secciones subsiguientes expondré los supuestos específicos correspondientes a cada versión.

Condiciones de balance

Las condiciones de balance del modelo se refieren a las ecuaciones que definen el equilibrio entre las entradas y las salidas del modelo tanto en términos monetarios como físicos. Para su definición se requiere incorporar lo que Merciai y Heijungs (2014) denominan "matrices satélite" para completar la igualdad entre los totales de filas y columnas de las tablas insumo-producto en los sectores que son a la vez consumidores y proveedores de energía. En la práctica, sin embargo, suelen identificarse vectores satélite en lugar de matrices, que se denominan satélite porque, a pesar de que aparecen de forma autónoma, estos vectores acompañan a la tabla insumo-producto principal en una suerte de fusión dentro de un solo marco de análisis. De hecho, en ocasiones su estimación puede surgir de la aplicación de precios implícitos que se obtienen al combinarse con las matrices del modelo tradicional de Leontief.

Estos vectores (fila), de dimensión **1 x n**, pueden ser de cuatro tipos: para factores primarios (**L**), para los insumos del sistema (**is**^{P}) que incluyen los recursos naturales, para el uso o la oferta de desperdicios (**w**^{P}) y para las emisiones (**e**^{P}). Solamente el primero de estos vectores se expresa en unidades monetarias porque define las remuneraciones a los factores primarios como la mano de obra. Mantengo los criterios de notación que he usado en todos los capítulos, además, no agrego supraíndices para distinguir las matrices y los vectores monetarios. Los otros tres vectores los detallo en unidades físicas y los especifico con el supraíndice **P**. En todos los casos indicados empleo una notación similar a la sugerida por Merciai y Heijungs (2014), aunque esta describe términos en inglés tales como: *labor* (**L**), *resources* (**r**^{P})*, wastes* (**w**^{P}), *emissions* (**e**^{P}) y *physical* (**P**). Esta decisión facilita el desarrollo que se presenta a continuación porque evita confusiones con la notación matricial utilizada en el resto del libro.

Empiezo por la condición económica usual de balance en términos monetarios y asumiré una matriz $\mathbf{Z}=\{z_{ij}\}$ cuadrada de dimensión **n × n**:

$$(1'_n\mathbf{Z}+\mathbf{l})' = \mathbf{Z}1_n + \mathbf{f} = \mathbf{x}$$

Donde $\mathbf{1}_n$ es un vector (columna) de unos,[1] de dimensión **n × 1.** Todas las matrices y vectores se expresan en dinero. El consumo intermedio del j-ésimo sector ($1'_n Z = [\sum_{i=1}^{n} z_{ij}]$) más la remuneración a los factores de producción ($\mathbf{l}_j$) que incluirá los impuestos debe coincidir con la i-ésima oferta total ($\mathbf{x}_i$) cuando **i=j**. En ocasiones consideraré, además, las importaciones entre estos rubros, cuando estas no se hallen incluidas en la matriz de relaciones

[1] Al posmultiplicar una matriz por $\mathbf{1}_n$, se obtiene un vector columna cuyos elementos son la suma de las filas de la matriz, en este caso $Z1_n = \sum_{j}^{n} z_{ij}$. De forma análoga, al premultiplicar la transpuesta $1'_n$ por una matriz, se obtiene un vector fila cuyos elementos son la suma de las columnas de la matriz.

interindustriales. Aparte, el consumo intermedio del i-ésimo producto ($Z1_n = [\sum_{j=1}^{n} z_{ij}]$) más su demanda final ($\mathbf{f}_i$) sumarán la i-ésima oferta total ($\mathbf{x}_i$).

La condición física, en cambio, parte de una matriz de flujos físicos cuyo balance se podrá verificar solamente para **k=1, ...,m, m<n** elementos energéticos.

Se puede partir de una formulación donde todos los vectores poseen **n** filas o columnas ordenados de forma tal que los primeros **1, ..., m** elementos corresponden a proveedores primarios o secundarios de energía, los siguientes **m+1, ..., n** elementos corresponden a sectores que consumen energía, y que la matriz $\mathbf{Z}^P=\{\mathbf{z}_{ij}^P\}$ es de dimensión **m x n** (como aparece en la tabla 1.2). A partir de estas consideraciones, en términos preliminares, la condición física de balance tendrá la siguiente forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{1}'_m\mathbf{Z}^P + \mathbf{r}^P + \mathbf{w}^P - \mathbf{e}^P)' = \mathbf{Z}^P\mathbf{1}_n + \mathbf{f}^P = \mathbf{x}^P$$
$$\mathbf{M}(\mathbf{x}^{PE})' = \mathbf{x}^P$$

Del lado derecho de la condición se construye el balance, desde los criterios tradicionales que se aplican a una matriz insumo-producto. Esta vez, sin embargo, se verifica el balance en unidades físicas, esto significa que al consumo intermedio ($\mathbf{Z}^P\mathbf{1}_n$) se agrega la demanda final ($\mathbf{f}^P$). El resultado de esta suma debe coincidir con la oferta total de energía de cada sector ($\mathbf{x}^P$). Todos estos vectores columna tienen dimensión **m** × **1**, es decir, son vectores columna que recogen a los sectores energéticos.

Del lado izquierdo de la condición se suman verticalmente las transacciones interindustriales y su resultado define un vector $\mathbf{1}'_m\mathbf{Z}^P$, se agregan a estos valores los vectores de recursos naturales ($\mathbf{r}^P$), de residuos ($\mathbf{w}^P$) y/o se descuenta el vector de emisiones ($\mathbf{e}^P$). Como resultado de esta suma se obtiene un vector fila que contiene a la oferta total tanto de los sectores energéticos como no energéticos ($\mathbf{x}^{PE}$). Todos estos vectores tienen dimensión **1** × **n**, es decir, son vectores fila. Por esta razón, es necesario realizar algunas operaciones para que mantengan su igualdad con el vector columna $\mathbf{x}^P$ de dimensión **m** × **1**. Tales operaciones consisten en transponer la suma de estos vectores y multiplicarlos por la matriz **M** de dimensión **m** × **n** y definida así:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{m}_{ij}] = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{i}=\mathbf{j} \text{ y } \mathbf{j} \text{ es un sector energético} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

Es decir, los elementos de la matriz **M** son iguales a **1** cuando tanto su fila como su columna corresponden con un sector energético. De esa manera, el vector resultante solo contiene aquellas filas que corresponden a sectores energéticos.

La condición de balance, como he indicado, es preliminar. Es preciso ajustarla por la disponibilidad neta de insumos en el sistema. Esta disponibilidad neta se mide a partir de tres componentes. El primer componente son las importaciones netas de recursos ($\mathbf{rin}^P=\mathbf{ri}^P-\mathbf{re}^P$), que cuentan la diferencia entre los flujos físicos de importación ($\mathbf{ri}^P$) y los flujos físicos destinados a la exportación ($\mathbf{re}^P$). El segundo componente sumará la variación neta de los inventarios ($\mathbf{vin}^P= \mathbf{vi}^P- \mathbf{cp}^P$). Esto significa contar la diferencia entre las existencias iniciales de cada fuente de energía o materia y las existencias al finalizar el

periodo de análisis ($\mathbf{vi}^P$), en este caso para cada año. Estos datos se encuentran disponibles en el balance energético de la OLADE (2017). Sin embargo, deberá tomarse en cuenta que el consumo propio y las pérdidas del proceso de transformación ($\mathbf{cp}^P$) ya han sido cuantificados en la matriz de transacciones interindustriales en términos físicos $\mathbf{Z}^P$, por lo que será necesario descontarlos de la cuenta de inventarios para evitar su doble contabilización. Finalmente, el tercer elemento por descontar en el ajuste de estas cuentas serán los recursos energéticos no aprovechados ($\mathbf{na}^P$). Todos estos vectores tienen dimensión **1 x n**.

Con estos elementos, la condición de balance se puede redefinir de la siguiente forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{1'}_m\mathbf{Z}^P + \mathbf{r}^P + \mathbf{rin}^P + \mathbf{vin}^P - \mathbf{na}^P + \mathbf{w}^P - \mathbf{e}^P)' = \mathbf{Z}^P\mathbf{1}_n + \mathbf{f}^P = \mathbf{x}^P$$

Merciai y Heijungs (2014) explican que el vector de residuos puede identificar valores positivos o negativos, según exhiba el uso o la generación de desperdicios, respectivamente. Los residuos en vertederos se han de considerar como emisiones. Sobre la base de esta descripción, para este análisis asumiré a las cuentas de $\mathbf{w}^P$ y $\mathbf{e}^P$ como ítems de balanceo, es decir, categorías que permiten garantizar el cumplimiento de la condición de balance del sistema (European Commission y Eurostat 2001).

Notaré como $\mathbf{dn}^P = \mathbf{1'}_m\mathbf{Z}^P + \mathbf{r}^P + \mathbf{rin}^P + \mathbf{vin}^P - \mathbf{na}^P$ al vector que agrega los elementos que componen la disponibilidad neta de insumos que emplea la economía (con dimensión **1 x n**), de manera que los ítems de balance se definirán así:

$$\mathbf{w}^P{}_{1xn} = [\mathbf{w}_j^P] = \begin{cases} |\mathbf{x}_j^{PE} - \mathbf{dn}_j^P| & \text{si } \mathbf{x}_j^{PE} > \mathbf{dn}_j^P \text{ y si } j \le m \\ 0 & \text{si } \mathbf{x}_j^{PE} \le \mathbf{dn}_j^P \text{ o si } j > m \end{cases}$$

$$\mathbf{e}^P{}_{1xn} = [\mathbf{e}_j^P] = \begin{cases} |\mathbf{x}_j^{PE} - \mathbf{dn}_j^P| & \text{si } \mathbf{x}_j^{PE} < \mathbf{dn}_j^P \text{ y si } j \le m \\ 0 & \text{si } \mathbf{x}_j^{PE} \ge \mathbf{dn}_j^P \text{ o si } j > m \end{cases}$$

Esto significa que una diferencia positiva entre el j-ésimo elemento de $\mathbf{x}^{PE}$ y $\mathbf{dn}^P$se interpretará como un flujo de desperdicios que se pueden usar en el sistema económico, es decir, una suerte de subproductos de la actividad económica ($\mathbf{w}_j^P$). Mientras que cuando se trate de una diferencia negativa se identificará con la generación de residuos o más precisamente con la generación de emisiones ($\mathbf{e}_j^P$). Por su parte, en aquellos casos de sectores no energéticos, los elementos de estos vectores se consideran nulos.

De esta manera, la condición de balance que caracteriza al sistema se puede plantear de la siguiente forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{dn}^P + \mathbf{w}^P - \mathbf{e}^P)' = \mathbf{Z}^P\mathbf{1}_n + \mathbf{f}^P = \mathbf{x}^P$$

Por la definición de la matriz de flujos físicos se conocen los intercambios intersectoriales de energía, es decir, la estructura de la matriz $\mathbf{Z}^P$. El vector $\mathbf{r}^P$ se identifica con la producción primaria de energía del balance energético (o con la extracción doméstica de materiales si se analiza un balance de materiales). Las importaciones netas, la variación de inventarios, el consumo propio, las pérdidas de la transformación y los recursos no

aprovechados (todos los cuales se recogen en los vectores $\mathbf{rin}^P$, $\mathbf{vin}^P$, $\mathbf{na}^P$) se detallan en el balance energético nacional. En todos los modelos que empleo en esta revisión tengo como punto de partida información sobre la oferta total y los insumos netos disponibles, ambos en unidades físicas. Por esta razón, los residuos o las emisiones se definirán respecto de la diferencia entre $\mathbf{x}^{PE}$ y $\mathbf{dn}^P$, cuando dicha diferencia es viable pese a la diferencia de dimensiones entre ambos vectores.

A la matriz de vectores satélite físicos tradicional (Merciai y Heijungs 2014) la notaré como $\mathbf{S}^P$, cuya dimensión es **s x n** en donde **s** define el número de satélites que operan en el modelo, en este caso serían tres (insumos satélite, residuos y emisiones), de modo que $\mathbf{S}^P = \begin{bmatrix} \mathbf{is}^P \\ \mathbf{w}^P \\ \mathbf{e}^P \end{bmatrix}$. Los insumos-satélite se definen como $\mathbf{is}^P = \mathbf{dn}^P - \mathbf{1'}_m\mathbf{Z}^P$.

Cabe reiterar que estas matrices y vectores se definen para un total de **n** sectores ordenados de tal forma que **1,..., m** corresponden a sectores energéticos y **m+1,...,n** corresponden a sectores no energéticos, de manera más general, diré que se trata de sectores económicos.

La matriz de intensidad ecológica, en este caso intensidad asociada a las cuentas satélite (o desde la lectura de su inverso, matriz de precios implícitos de los flujos ecológicos), se mide por $\mathbf{D}^S = [\mathbf{d}_{sj}{}^S] = \left[\frac{\mathbf{s}_{sj}{}^P}{\mathbf{x}_j}\right]$, que muestra cierto tipo de coeficientes técnicos de dimensión **s x n** y que se obtienen por:

$$\mathbf{D}^S = \mathbf{S}^P(\widehat{\mathbf{x}^{PE}})^{-1}$$

Donde $\widehat{\mathbf{x}^{PE}}$ es una matriz cuadrada diagonal cuyos elementos no nulos contienen a los elementos del vector fila $\mathbf{x}^{PE}$, es decir $\widehat{\mathbf{x}_{ij}^{PE}} = \mathbf{x}_i^{PE}, \mathbf{i = j}$ y $\widehat{\mathbf{x}_{ij}^{PE}} = \mathbf{0}, \mathbf{i \neq j}$. Dada esta definición se tiene que la matriz $\mathbf{S}^P$ se puede obtener así:

$$\mathbf{S}^P = \mathbf{D}^S(\widehat{\mathbf{x}^{PE}})$$

Los precios implícitos de los vectores satélite se agrupan en la matriz $\mathbf{P}^S$, de dimensión **s x n**. Los precios implícitos se definen por el recíproco de la intensidad ecológica como detallo a continuación:

$$\mathbf{P}^S = [\mathbf{P}_{sj}{}^S] = \begin{cases} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{d}_{sj}{}^S} \text{ si } \mathbf{d}_{sj} \neq \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \quad \text{si } \mathbf{d}_{sj} = \mathbf{0} \end{cases}$$

No obstante, este enfoque carece de las condiciones necesarias para garantizar que se cumpla el principio de conservación en el modelo. Así lo han demostrado Merciai y Heijungs (2014), cuya explicación sobre precios implícitos revisaré en el capítulo 3. Por esta razón, propongo una nueva forma de plantear la matriz de cuentas satélite, que defino como $\tilde{\mathbf{S}}^P$, de dimensión **s x n** tal que:

$$\tilde{\mathbf{S}}^P = \tilde{\mathbf{D}}^S(\widehat{\mathbf{x}^{PE}} - \widehat{\mathbf{1'}_m\mathbf{Z}^P})$$

En donde $\tilde{D}^S$ ya no se identifica como un factor de intensidad energética, sino que en su lugar, mide la participación de cada cuenta satélite en la oferta energética total ajustada por el consumo intermedio medido en unidades físicas $(\widehat{x^{PE}} - \widehat{1'_m Z^P})$. Aquí el término $\widehat{1'_m Z^P}$ corresponde a una matriz diagonal cuyos elementos no nulos contienen a los respectivos elementos del vector fila $1'_m Z^P$. La descripción de los elementos de la matriz $\tilde{S}^P$ que presento a continuación:

$$\tilde{S}^P_{s\,x\,n} = [\tilde{s}_{sj}{}^P] = \begin{cases} \tilde{s}_{1j}{}^P = is_j{}^P = \tilde{d}^s_{1j} \times \left(x_j{}^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}{}^P \right) \\ \tilde{s}_{2j}{}^P = w_j{}^P = \tilde{d}^s_{2j} \times \left(x_j{}^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}{}^P \right) \\ \tilde{s}_{3j}{}^P = e_j{}^P = \tilde{d}^s_{3j} \times \left(x_j{}^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}{}^P \right) \end{cases}$$

En donde $\tilde{D}^S$ se define así:[2]

$$\tilde{D}^S = \tilde{S}^P (\widehat{x^{PE}} - \widehat{1'_m Z^P})^{-1}$$

$$\tilde{D}^S = [\tilde{d}^S_{sj}] = \begin{cases} \tilde{d}^S_{1j} = \dfrac{is_j{}^P}{x_j{}^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}{}^P} \\ \tilde{d}^S_{2j} = \dfrac{w_j{}^P}{x_j{}^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}{}^P} \\ \tilde{d}^S_{3j} = \dfrac{e_j{}^P}{x_j{}^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}{}^P} \end{cases}$$

Esta definición debe cumplirse siempre que se verifique la identidad contable básica del sistema en unidades físicas, las cuales reordeno para evidenciar los términos que interesan en este análisis, como presento a continuación:

$$M(is^P + w^P - e^P)' = x^P - M(1'_m Z^P)'$$

Esta definición de las cuentas satélite, que parte de las condiciones y restricciones del propio sistema concebido desde su dimensión física permite verificar el principio de conservación, las condiciones de balance y, además, mantener la estructura de las cuentas satelitales definida desde los propios intercambios físicos. La ventaja de esta propuesta es que permite identificar cuándo se produce inicialmente un desbalance en esta identidad, de manera que este puede ajustarse. En un capítulo posterior demostraré que esta anomalía tiene lugar en el caso de los precios implícitos homogéneos, en donde $M(is^P + w^P - e^P)' \neq x^P - M(1'_m Z^P)'$ porque los intercambios interindustriales, en términos físicos, tendrán la estructura establecida por la circulación que se defina en el sistema económico. Por esta razón, el término $1'_m Z^P$ será distinto al que se defina a partir del modelo aplicado con precios no homogéneos. En este caso será necesario calcular la fracción $\tilde{D}^S$ respecto del factor que permite el ajuste, es decir, $(is^P + w^P - e^P)$ para luego calcular $\tilde{S}^P$ en función del factor $(x^P - M(1'_m Z^P)')$.

[2] La definición matricial de $\tilde{D}^S$ puede requerir que la matriz diagonal $(\widehat{x^{PE}} - \widehat{1'_m Z^P})$ sea ajustada para poder invertirse. El ajuste comprendería el reemplazo de los valores nulos de la diagonal principal por valores unitarios.

Como explicaré más adelante, una cuestión que queda pendiente con estos dos mecanismos de balanceo es que puede ser necesario incorporar una restricción de partida para el modelo, que consiste en mantener fija la cuenta satélite de los insumos netos del sistema para cualquier construcción de una matriz insumo-producto física. Esta restricción se justifica debido a que la disponibilidad de insumos es una característica física del sistema que se halla condicionado por la capacidad de acceder a los recursos. En tales circunstancias, dicha disponibilidad no podría alterarse según el esquema de precios que caracterice al modelo de análisis, solamente las variaciones en la demanda final o en la propia estructura de los intercambios energéticos o económicos podrían alterar la disponibilidad inicial de recursos. Por esta razón, propongo incorporar como condición de partida que los flujos de insumos netos se mantengan invariables entre los distintos modelos. Esto implica, sin embargo, que sean los ítems de balance de residuos y emisiones los que se ajusten conforme he explicado en esta sección.

La pregunta que surge ahora es: ¿qué tipo de balanceo corresponde usar? Mi respuesta es que depende de las condiciones iniciales del análisis. En mi opinión, este último mecanismo de balanceo que he planteado es correcto para las condiciones iniciales del sistema porque evidencia la disponibilidad real de recursos físicos existentes, sea por la extracción doméstica, las importaciones o las variaciones de inventarios. En cambio, cuando el sistema sufre modificaciones, por ejemplo, debido a un incremento o reducción en la demanda final, se producen alteraciones en la estructura misma del sistema que ocasionarán modificaciones también en la dimensión física.

La forma correcta de abordar estas alteraciones en la parte física sería a través de las matrices $\tilde{\mathbf{D}}^{S}$ y $\tilde{\mathbf{S}}^{P}$, porque de esta forma se recogen los cambios en la estructura, pero, al mismo tiempo, se mantiene la naturaleza de los flujos ecológicos que circulan en el sistema mediante sus respectivas ponderaciones en las cuentas físicas. Cuando aplique el método en el caso ecuatoriano que presentaré en los siguientes capítulos, y en la réplica del ejemplo de Merciai y Heijungs (2014) que realizaré en el capítulo sobre precios implícitos, contrastaré los resultados de estas propuestas.

Matriz insumo-producto energética conforme el método de la energía incorporada

La matriz de entradas y salidas de energía que empleo en mi versión del modelo de Alcántara y Roca (1995) comprende la contabilización de los usos no energéticos de algunas categorías. Este es el caso del aceite agrícola (*spray oil*) y los lubricantes identificados como otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes) en la tabla de utilización. Esta es una modificación respecto del trabajo de Buenaño (2017), quien omite los consumos de sectores no energéticos, por lo tanto, en este caso asume inexistente el empleo de otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes) en sectores distintos al transporte. En esta aplicación del modelo, los insumos que corresponden a la categoría de otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes) se redistribuyen en dos

clases de uso de la energía: 1) para transporte en calidad de empleo energético y 2) para fines no energéticos en el resto de los sectores económicos que los aprovechan. Además, los insumos clasificados como *spray oil* se asignan a los usos no energéticos porque comprenden la producción de aceite agrícola, empleado para el control de plagas antes que como combustible.

Este supuesto sobre los usos no energéticos lo relajo para la versión de la matriz de entradas y salidas de energía que explicaré en la siguiente sección y emplearemos en los siguientes capítulos.

En la tabla 1.3 presento los detalles de la compatibilidad entre las categorías de energía de la tabla de utilización en unidades monetarias y el balance energético en unidades físicas para construir la matriz de entradas y salidas de energía, que sirve de base para replicar el estudio de Buenaño (2017).

Tabla 1.3. Compatibilidad de las categorías de energía entre unidades monetarias y físicas

Tabla de utilización			Balance energético
CPCN	**Productos**	**Industrias**	
004002007	Caña de azúcar	Todos	Caña de azúcar
006001001	Madera sin elaborar	Todos	Leña
009001001	Petróleo crudo	Todos	Petróleo
009001002	Gas natural		Gas natural
024001001	Gasolinas	Todos	Gasolina/alcohol
024001002	Naftas y gasolina natural		
024001003	Diésel	Todos	Diésel
024001004	*Fuel oil*	Todos	*Fuel oil*
024001005	*Spray oil*	Todos	No energético
024001006	Otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes)	Transporte y almacenamiento	Kerosene/*jet fuel*
		Todos los demás	No energético
024001007	Gases de hidrocarburos	Todos	Gas licuado y otros
033002002	Gas de productos diferentes al petróleo y distribución de gas por tuberías		
024001009	Otros productos y subproductos de petróleo; coque y alquitrán	Todos	Otras secundarias
033001001	Energía eléctrica	Todos	Hidroenergía
033001002	Servicios de transmisión y distribución eléctrica	Todos	Electricidad

Fuente: BCE (2016) y OLADE (2016).

Nota: CPCN (clasificación de productos de cuentas nacionales).

Tal como se explicó, empleo a lo largo del texto la notación matricial habitual con negrillas. Las matrices se indicarán con letras mayúsculas (como **A**), los vectores columna con minúsculas (como **x**) y los vectores fila usualmente corresponderán a vectores columna transpuestos (como **x'**). Un vector que se transforma en una matriz diagonal se notará como $\hat{\mathbf{x}}$. Dos subíndices indicarán la ubicación de un elemento de una matriz (como $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{ij}]$), y un subíndice, el elemento de un vector (como $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_j]$).

Emplearé una matriz de entradas y salidas de energía de dimensión $(\mathbf{m + 1}) \times (\mathbf{m + 1})$, en donde **m** es el número de sectores energéticos considerados. El último sector corresponde al no energético, que se incluye en el análisis porque tiene un considerable contenido de energía, aunque esta no se utiliza para fines energéticos. Esta matriz de flujos energéticos la notaré como $\mathbf{Z}^{PA}$ para distinguirla de la que usaré en los capítulos posteriores para los métodos híbridos. El supraíndice **PA** es indicativo de que se trata de una matriz física (**P**) elaborada sobre la base del procedimiento (**A**), es decir, de Alcántara, Padilla y Piaggio (2017).

A partir de la matriz de entradas y salidas de energía $\mathbf{Z}^{PA}$, seguiré el procedimiento de Gutiérrez et al. (2018) y construiré, en analogía al modelo de Leontief, una matriz cuadrada de insumos directos que notaré como $\mathbf{A}^{PA}$, de dimensión $(\mathbf{m + 1})$ x $(\mathbf{m + 1})$ que también puede interpretarse como una matriz de coeficientes técnicos que se elabora desde las cuentas físicas:

$$\mathbf{A}^{PA} = \mathbf{Z}^{PA}(\hat{\mathbf{x}}^{PA})^{-1}$$

En donde $\mathbf{Z}^{PA}$ es la matriz de flujos de entrada y salida de energía que ya he descrito, y $\mathbf{x}^{PA}$ corresponde al vector de oferta total en unidades físicas, que incluye recursos energéticos y no energéticos, y tiene dimensión $(\mathbf{m + 1})\ \mathbf{x\ 1}$. Así, la matriz $\mathbf{A}^{PA}$ muestra las unidades de insumos energéticos que se requieren de forma directa para generar cada unidad de la oferta.

Con estos elementos se puede calcular la matriz de requerimientos totales (directos + indirectos) de energía $\mathbf{L}^{PA} = (\mathbf{I}_{m+1} - \mathbf{A}^{PA})^{-1}$, en analogía a la inversa de Leontief, en donde $\mathbf{I}_{m+1}$ es la matriz identidad de dimensión $(\mathbf{m + 1}) \times (\mathbf{m + 1})$.

Con el objeto de expresar los requerimientos de energía primaria ligados al consumo final de energía, la matriz anterior se modifica con la supresión de aquellas filas que corresponden a energías secundarias y aquellas columnas que registran flujos de energía primaria, de esta manera se conforma la matriz $\mathbf{T}_{k,j+1}$ de dimensión $\mathbf{k} \times (\mathbf{j+1})$.

Alcántara y Roca (1995) identifican a **T** como la matriz de transformación de los datos de consumo final de energía en datos de energía primaria. Se consideran **k** fuentes primarias de energía y **j+1** fuentes secundarias. El último sector en el análisis es el de los productos no energéticos.

$$\mathbf{T} = [\mathbf{t}_{k,j+1}] = [\mathbf{I}^{PA}_{k,\ j+1}]$$

Para **k** fuentes primarias y **j+1** fuentes secundarias y no energéticas.

Los resultados de esta matriz se interpretan a partir de la suma de cada columna que se determina por producto $\mathbf{1'_k T}$. Cada elemento de este vector muestra la cantidad de energía primaria que se requirió invertir para generar una unidad del producto energético (o no energético) correspondiente.

Otro concepto que se puede analizar son los requerimientos de energía primaria ligados al consumo final, que muestran en términos absolutos el consumo interindustrial de energía desde la aplicación de un esquema de precios implícitos que proponen Gutiérrez et al. (2008), y que aplica Buenaño (2017) en el caso ecuatoriano. Esta información no se encuentra disponible de forma directa, sin embargo, puede derivarse al combinar la información del consumo energético sectorial y el consumo no energético, disponibles en el balance energético, con los datos de la actividad interindustrial de la tabla de utilización que publica el Banco Central del Ecuador. Para obtener esta información, seguiré un procedimiento similar al aplicado por Buenaño (2017), conforme explico a continuación.

Al compatibilizar la información económica con la energética, según la clasificación presentada arriba, a partir de la tabla de utilización se construye una submatriz insumo-producto en unidades monetarias, en este caso dólares de 2007, para $\mathbf{n = 71}$ sectores económicos y $\mathbf{m + 1 = 13}$ sectores que incluyen aquellos que consumen energía más un sector no energético. En el anexo 1, codificación A, se detallan las actividades que componen esta información. Notaré a esta matriz como $\mathbf{Z^A}$ de dimensión $\mathbf{(m + 1) \times n}$, que muestra los intercambios económicos interindustriales de los sectores energéticos y el sector no energético que analizo. Como he indicado, seguiré el enfoque de Alcántara y Roca (1995).

Con la matriz $\mathbf{Z^A}$ se estiman los coeficientes técnicos $\mathbf{B^A}$, una matriz de dimensión $\mathbf{(m + 1) \times n}$, que se define a partir del consumo intermedio total de los sectores energéticos, la cual notaré como $\mathbf{Z^A 1_n}$, en donde $\mathbf{1_n}$ es un vector de unos que permite operar la sumatoria de las columnas para obtener la distribución del consumo intermedio por filas, es decir por sectores energéticos **m**, más el sector no energético. Se aplica la siguiente definición:

$$\mathbf{B^A = (\widehat{Z^A 1_n})^{-1} Z^A}$$

En donde $\mathbf{\widehat{Z^A 1_n}}$, cuya dimensión es $\mathbf{(m + 1) \times (m + 1)}$, es una matriz diagonal del consumo intermedio total distribuido por sectores de consumo energético más el sector no energético. Esta matriz se vincula con la distribución del consumo energético sectorial que se detalla por fuentes primarias y secundarias en el balance de energía anual. Estos datos corresponden al consumo final, que notaré como $\mathbf{f^{PA}}$. Se trata de un vector columna de dimensión $\mathbf{(m + 1) \times 1}$ medido en Kbep. Con estos elementos definimos el consumo interindustrial de energía $\mathbf{E^P}$ a partir de la siguiente formulación:

$$\mathbf{E^P = \widehat{f^{PA}} B^A}$$

La matriz $\mathbf{E^P}$ tiene dimensión $\mathbf{(m + 1) \times n}$. Esta matriz muestra la distribución del consumo final de energía entre industrias para **m** sectores energéticos y un sector no energético, y su asignación entre 71 sectores económicos.

Esta última ecuación estructura un modelo con un esquema de precios implícitos homogéneos entre los distintos sectores económicos que abordaré en detalle en el capítulo 3. Buenaño (2017) explica que se trata de un supuesto adecuado en un contexto de precios controlados de todos los combustibles, que ha existido en el Ecuador desde hace más de cuarenta años, y solo se ha modificado en el periodo reciente, mediante un modelo de comercialización de combustibles que se maneja a través de una banda móvil de ± 5 % de variación –definida mensualmente por Petroecuador–. No obstante, varios autores anticipan resultados que no necesariamente cumplen la ley de la conservación de la energía bajo estas condiciones (Merciai y Heijungs 2014; Miller y Blair 2009). Evaluaré estas condiciones en detalle en los siguientes capítulos y explicaré las limitaciones y ventajas del enfoque de precios implícitos homogéneos para derivar una matriz insumo-producto en términos físicos.

Cabe indicar que busco estudiar los efectos del consumo de energía en toda la economía, y no solamente el consumo del aparato productivo en particular, que ha sido ya analizado por Buenaño (2017). Esta aclaración es importante porque la información del consumo sectorial que emplea Buenaño (2017) en su estudio incorpora al sector eléctrico a partir de los datos de insumos de la transformación. En este caso asumo que el consumo final reportado en el balance energético no requiere de estos ajustes.

Por último, calcularemos las emisiones de CO_2 asociadas a esta estructura de consumo energético a partir de los coeficientes de emisión sectorial que publica la OLADE (2017), según las estimaciones regionales basadas en los procedimientos del IPCC (2006). Para ello, se requiere contabilizar las cuentas de consumo energético en *joules* (J), una unidad energética cuya equivalencia a los Kbep es de 5,8066 TJ.[3] Se toma el equivalente al consumo energético intermedio, que corresponde a la suma por filas de la matriz $\mathbf{E^P}$, cuyo cálculo también se obtiene por el producto $\mathbf{E^P 1_n}$.

Computo las emisiones de CO_2 sobre la base de los coeficientes publicados por la OLADE (2017) para cada fuente de energía (**m + 1**) y distribución según sectores de consumo energético (**s**), donde **s = n - m**, que defino como la matriz de intensidad de emisiones $\mathbf{IECO_2}=[\mathbf{ieco}_{2_{ms}}]$, la cual se expresa en kg de CO_2/TJ. Con una estructura similar se describe el consumo sectorial de energía en la matriz $F^{PA}=[f^{PA}_{ms}]$, la cual se obtiene de los balances energéticos que publica la OLADE cada año y debe expresarse en unidades energéticas, específicamente TJ. Las emisiones asociadas al consumo sectorial de energía se definen por el producto elemento a elemento de estas dos matrices que dan origen a la matriz $\mathbf{ECO_2}$ de dimensión **(m + 1) x s**, la cual se expresa en Kton de CO_2:

$$\mathbf{ECO_2}=[\mathbf{eco}_{2_{ms}}]=[\mathbf{f}^{\mathbf{PA}}_{\mathbf{ms}} \times \mathbf{ieco}_{2_{ms}}]$$

$\mathbf{ECO_2}$ sirve de base para obtener el vector de emisiones de CO_2 por fuente, conforme la estructura del consumo sectorial. Este vector se define por el producto $\mathbf{ECO_2 1_S}$. Este producto corresponde a la sumatoria de cada fila de la matriz $\mathbf{ECO_2}$.

[3] Cada *terajoule* comprende $1x10^{12}$ *joules*.

La ratio entre las emisiones de CO_2 ($\mathbf{ECO_2 1_S}$) y el consumo energético ($\mathbf{E^P 1_n}$) por cada fuente, ambos vectores columna de dimensión $(\mathbf{m + 1}) \times \mathbf{1}$, determina el total de emisiones de CO_2 por unidad de energía que se ha consumido, en este caso ton CO_2/Kbep para cada uno de los sectores energéticos y el sector no energético que analizo. Esta ratio la notaré como el vector **e**, igualmente de dimensión $(\mathbf{m + 1}) \times \mathbf{1}$:

$$\mathbf{e}=[\mathbf{e}_{m+1}]=\begin{cases}\dfrac{(\mathbf{ECO_2 1_s})_{m+1}}{(\mathbf{E^P 1_n})_{m+1}} & \textbf{si} \quad (\mathbf{E^P 1_n})_{m+1}\neq\mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \textbf{si} \quad (\mathbf{E^P 1_n})_{m+1}=\mathbf{0}\end{cases}$$

Finalmente, se obtienen las emisiones de CO_2 interindustriales al determinar el producto

$$\mathbf{CO_2}=\hat{\mathbf{e}}\ \mathbf{E^P}$$

En donde $\hat{\mathbf{e}}$ es una matriz diagonal de las emisiones de CO_2 por unidad de energía consumida. La matriz $\mathbf{CO_2}$, de dimensión $(\mathbf{m + 1}) \times \mathbf{n}$, se encuentra expresada en Kton de CO_2 y muestra las emisiones interindustriales, es decir, aquellas asociadas a la distribución del consumo final de las diversas fuentes de energía y el sector no energético, entre **n** sectores económicos.

En la sección de resultados anotaré las diferentes estimaciones que resultan de la aplicación del método propuesto originalmente por Alcántara y Roca (1995), el cual he adaptado para evidenciar de mejor forma la realidad ecuatoriana.

Matriz insumo-producto energética para los modelos de unidades híbridas

En esta sección explico la construcción de la matriz física que propongo como base para la aplicación de los métodos híbridos que expongo en los siguientes capítulos.

Como he anotado antes, esta es una segunda versión de la matriz de entradas y salidas de energía, cuya base original es la propuesta de Alcántara y Roca (1995). La diferencia más notable en mi propuesta es que incorporo el consumo final de energía de los diversos sectores económicos en la matriz de entradas y salidas de energía, desde una contabilización que es consistente con la oferta total del balance energético. En efecto, la suma horizontal de estos flujos determina un valor equivalente al consumo intermedio. Dejo para el consumo final los valores del consumo energético residencial y no energético. En este caso organizo el resto de la información sobre la base de la estructura del balance energético de la OLADE, en donde la suma del consumo intermedio, los ajustes estadísticos y el consumo final determinan la oferta total del sistema que permite verificar el cumplimiento de la ecuación de balance en esta matriz.

Esto significa que en mi versión cuento con $\mathbf{n = m + s}$ sectores de análisis, que incluyen **m** sectores energéticos y **s** sectores económicos detallados en el balance de energía. A excepción del consumo residencial y el consumo no energético, el resto de los sectores se pueden contrastar y equiparar con las categorías de la tabla de utilización. El procesamiento de la

información económica que tomé de la tabla de utilización no lo explico en este capítulo, sino en el siguiente. Por ahora basta con indicar que en la matriz insumo-producto energética uso la desagregación más detallada posible de los sectores energéticos y adapto la información de la tabla de utilización al detalle del consumo energético sectorial disponible en el balance de energía.

La distinción para el sector no energético se aplica de manera distinta en este caso, debido a que en las aplicaciones de los métodos híbridos utilizo una matriz insumo-producto de balance idéntico entre los totales de filas y columnas que derivo de la tabla de utilización, conforme las categorías de sectores energéticos y económicos que me interesan en el análisis. Esto significa que mi desagregación sectorial no excluye información de la tabla de utilización, por lo que el uso energético y/o económico que corresponde a cada categoría puede mantenerse. En el método propuesto por Alcántara y Roca (1995), en cambio, se emplea una submatriz insumo-producto monetaria que se extrae de la tabla de utilización solamente para los sectores energéticos analizados. En ese contexto, tiene sentido distinguir dentro de esa misma estructura los usos energéticos y no energéticos de los recursos, porque se omite una parte de la información económica.

De esta forma, para esta versión de la matriz insumo-producto energética resuelvo que la categoría de no energéticos no se distribuye sectorialmente, sino que se registra en el vector de consumo final. Considero que esta forma de construir esta categoría de flujos es consistente con los métodos híbridos que aplico. En el caso de la matriz de unidades híbridas, los usos energéticos y no energéticos se diferencian desde las propias unidades de medida de cada rubro. Así, los sectores no energéticos se expresan en unidades monetarias y los energéticos en unidades físicas. En el caso de la matriz análoga necesaria para la aplicación del método de precios implícitos no se podrá identificar en la tabla de utilización categorías específicas a las que corresponda el sector no energético que se reporta en el balance de energía, por lo que será correcto registrar el consumo no energético en la cuenta de consumo final. En la tabla 1.4. presento la distribución de las categorías de análisis que compatibiliza la tabla de utilización y el balance energético.

Con estos elementos, la tabla insumo-producto en unidades físicas que emplearé en los siguientes capítulos se distribuye en $\mathbf{n = m + s}$ sectores, de los cuales **m** son energéticos y **s** son económicos, por lo tanto, puedo desarrollar los modelos híbridos.

Tabla 1.4. Categorías de análisis que compatibilizan la tabla de utilización con el balance energético

Tabla de utilización				Balance energético
CPCN	**Productos**	**CPCN**	**Industrias**	
004002007	Caña de azúcar	004002	Cultivo oleaginosas e industriales	Caña de azúcar
006001001	Madera sin elaborar	006001	Silvicultura, extracción de madera y actividades relacionadas	Leña
009001001 009001002	Petróleo crudo Gas natural	009001	Extracción de petróleo crudo y gas natural	Petróleo Gas natural
024001001 024001002	Gasolinas Naftas y gasolina natural	024001	Fabricación de productos refinados de petróleo y de otros	Gasolina/alcohol
024001003	Diésel			Diésel
024001004	*Fuel oil*			*Fuel oil*
024001006	Otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes)			Kerosene/*jet fuel*
024001007 033002002	Gases de hidrocarburos Gas de productos diferentes al petróleo y distribución de gas por tuberías			Gas licuado y otros
024001009	Otros productos y subproductos de petróleo; coque y alquitrán			Otras secundarias
033001001	Energía eléctrica	033001	Generación, captación y distribución de energía eléctrica	Hidroenergía
033001002	Servicios de transmisión y distribución eléctrica	033002	Captación, depuración y distribución de agua y saneamiento	Electricidad

Fuente: OLADE (2017).

Nota: CPCN (clasificación de productos de cuentas nacionales).

Resultados

El método de la energía incorporada

Para exponer los resultados de la aplicación de este método a la economía ecuatoriana en el año 2016, en primer lugar, presento la matriz de entradas y salidas de energía $\mathbf{Z}^{PA}$, conforme el detalle metodológico que he anunciado. Para fines exclusivamente didácticos, en esta sección expongo los resultados para un sistema que comprende $\mathbf{m + 1 = 5}$ sectores, de los cuales $\mathbf{m = 4}$ son energéticos y uno es no energético. Los sectores energéticos son los siguientes: 1) primarios renovables, 2) primarios no renovables, 3) electricidad y 4) derivados de petróleo. El sector no energético es el que se reporta en el balance energético de la OLADE. Este no presenta consumo intermedio en su propio sector, pero sí consumo final. Más adelante, en esta sección se incorporarán los sectores económicos de consumo energético.

Quiero aclarar que los resultados serán distintos de aquellos que presentaré en el último capítulo, puesto que al agregar la información se pierden relaciones intersectoriales importantes. Hace falta incorporar las condiciones de balance en esta matriz. Para ello, en la tabla 1.5. introduzco tres ítems: insumos satélite $\mathbf{is}^{PA}$, residuos $\mathbf{w}^{PA}$ y emisiones $\mathbf{e}^{PA}$, todos expresados en unidades energéticas que se calculan de acuerdo con la explicación presentada en la sección metodológica.

Esta matriz muestra que el 54 % de los requerimientos energéticos del sistema son para el consumo intermedio, el 46 % restante que registro como $\mathbf{f}^{PA}$ **+ aj** se destina principalmente para el consumo final y una pequeña proporción para ajustes estadísticos (**aj**) que reportan los datos del balance energético de la OLADE (2016). Además, el sistema solamente genera emisiones y no desperdicios, la mayor parte corresponde al sector eléctrico. Una cifra negativa en los insumos satélite se explica porque es mayor la cantidad de insumos energéticos que se emplean en las actividades interindustriales que la cantidad de insumos energéticos disponibles internamente para la oferta.

Ahora, en la tabla 1.6 presento la matriz de insumos directos $\mathbf{A}^{PA}$, que muestra las unidades de insumos energéticos que se requieren de forma directa para generar cada unidad de la oferta. Así, por ejemplo, se conoce que cada unidad de la oferta energética requiere 2,12 unidades de distintos insumos energéticos, principalmente fuentes renovables y derivados de petróleo.

$$\mathbf{A}^{PA} = \mathbf{Z}^{PA}(\mathbf{x}^{\widehat{PA}})^{-1}$$

Asimismo, en la tabla 1.7 los requerimientos totales de energía del sistema se obtienen, en analogía al modelo tradicional de Leontief, así: $\mathbf{L}^{PA} = (\mathbf{I}_{m+1} - \mathbf{A}^{PA})^{-1}$

La lectura de esta información es el requerimiento directo e indirecto de las diversas fuentes de energía para generar cada unidad de la oferta total. Así, por ejemplo, la generación de una unidad de electricidad requiere una inversión directa de 2,12 unidades de energía y una inversión total, que incluye los requerimientos indirectos producto de las interacciones intersectoriales de 4,16 unidades de energía. El 40 % de los requerimientos directos de energía

Tabla 1.5. Entradas y salidas de energía (10^6 bep)

Z^{PA}	1	2	3	4	5	$Z^{PA}1_m$	f^{PA}+aj	x^{PA}
1	0,00	0,00	14,29	0,13	0,00	**14,42**	3,42	**17,84**
2	0,00	0,76	6,83	59,31	1,78	**68,68**	0,18	**68,86**
3	0,00	0,00	2,45	0,00	0,00	**2,45**	14,27	**16,73**
4	0,00	0,00	11,95	3,02	0,00	**14,97**	67,21	**82,19**
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**	1,73	**1,73**
$1'_mZ^{PA}$	**0,00**	**0,76**	**35,51**	**62,47**	**1,78**	**100,52**	**86,81**	**187,33**
is^{PA}	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00			
w^{PA}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
e^{PA}	0,00	0,00	16,14	1,81	0,05			
$(x^{PA})'$	**17,84**	**68,86**	**16,73**	**82,19**	**1,73**			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético.

Tabla 1.6. Requerimientos directos de energía

A^{PA}	1	2	3	4	5
1	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00
2	0,00	0,01	0,41	0,72	1,03
3	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,71	0,04	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	**0,00**	**0,01**	**2,12**	**0,76**	**1,03**

Nota: los encabezados de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético.

Tabla 1.7. Requerimientos totales de energía

L^{PA}	1	2	3	4	5
1	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00
2	0,00	1,01	1,12	0,76	1,04
3	0,00	0,00	1,17	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,87	1,04	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Total	**1,00**	**1,01**	**4,16**	**1,80**	**2,04**

Nota: los encabezados de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético.

para la generación de electricidad son recursos renovables y el 34 %, derivados de petróleo. Cuando se incluyen los requerimientos indirectos, las necesidades energéticas se duplican, pero ahora el origen de estos recursos se diversifica de este modo: 24 % fuentes renovables, 27 % fuentes no renovables, 28 % electricidad y 21 % derivados de petróleo.

Alcántara y Roca (1995) proponen una lectura de la energía incorporada para entender mejor el rol de los requerimientos energéticos primarios del sistema, la cual permite interpretar el aporte de la naturaleza en su dimensión energética para el funcionamiento del sistema de transformación energética. Este análisis se realiza desde la matriz de transformación $\mathbf{T}=[\mathbf{t}_{k,j+1}]=[\mathbf{l}^{PA}_{k,\,j+1}]$ cuyos resultados muestro en la tabla 1.8.

Para el año 2016, se estima que por cada unidad de electricidad (sector 3) que se produjo a nivel nacional se requirieron casi 2,12 unidades de energía primaria, de la cual el 47 % se originó en fuentes renovables (sector 1) y el 53 % en no renovables (sector 2). De esta forma, este cálculo mide la eficiencia en el proceso de transformación necesario para obtener los distintos productos energéticos y, a la vez, permite identificar un sistema altamente dependiente de fuentes agotables de energía.

En 2013, el gobierno del Ecuador emprendió un plan de transformación de la matriz energética orientado a impulsar la sostenibilidad y diversificación en la generación. Los avances en el marco de este plan de reconversión energética nacional se pueden determinar al contrastar estos resultados con aquellos que corresponden a 2013, cuyo detalle muestro en la tabla 1.9.

Estas cifras muestran que efectivamente se ha reducido la dependencia respecto de las fuentes no renovables de energía en la producción de electricidad. En 2013, estas fuentes representaban el 61 % de los requerimientos energéticos del sistema eléctrico nacional. Asimismo, el uso de fuentes renovables de energía para la generación de electricidad se ha incrementado en una tasa de crecimiento acumulado de 27 % entre 2013 y 2016. La eficiencia del sistema no se ha modificado mucho, pero tiende a empeorar. Mientras en 2013 cada unidad de la oferta energética requirió 2,03 unidades de fuentes primarias, en 2016 esta cifra aumentó a 2,12.

El siguiente paso en el MEI es añadir la información económica, para ello emplearé la tabla de utilización expresada en dólares de 2007 que se detalla para 71 sectores económicos y la organizo para mostrar información sobre $\mathbf{m + 1 = 5}$, de los cuales cuatro son sectores energéticos y uno es no energético. Para la presentación de estos resultados, sin embargo, agrego la información monetaria y explico el método con solamente $\mathbf{n=5}$ sectores económicos: 1) agropecuario, pesca y minería; 2) industrial; 3) construcción; 4) transporte y 5) servicios y comercio. La matriz de flujos económicos interindustriales de la energía la noto como $\mathbf{Z}^{A}$ (tabla 1.10).

En este caso, sin embargo, no se emplea una matriz de balance idéntico entre los totales de filas y columnas, sino un extracto de la tabla de utilización que solo incluye a los sectores que consumen energía. Se realiza un procedimiento que se asemeja al del modelo tradicional de Leontief para definir una matriz de coeficientes técnicos: $\mathbf{B}^{A}=(\widehat{\mathbf{Z}^{A}\mathbf{1}_{n}})^{-1}\,\mathbf{Z}^{A}$, la cual presento en la tabla 1.11.

El producto de esta matriz con el consumo final en unidades físicas permite determinar los requerimientos energéticos del sistema. Aunque con este procedimiento no se definen directamente precios implícitos de la energía, su aplicación traslada la estructura

Tabla 1.8. Eficiencia energética del sistema (bep invertido/bep producido)

T_{2016}	3	4	5
1	1,00	0,00	0,00
2	1,12	0,76	1,04
Total	**2,12**	**0,76**	**1,04**

Nota: los encabezados de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables, (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético.

Tabla 1.9. Eficiencia energética del sistema. Ecuador 2013 (bep invertido/bep producido)

T_{2013}	3	4	5
1	0,79	0,00	0,00
2	1,24	0,69	1,05
Total	**2,03**	**0,69**	**1,05**

Nota: los encabezados de la matriz son (1) primarios renovables (2) primarios no renovables, (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético.

Tabla 1.10. Matriz de flujos económicos de los sectores que consumen energía (millones de dólares de 2007)

Z^A	APM	Ind.	C.	Trans.	Serv. y comercio	$Z^A 1_n$
1	125	626	480	0	1 150	**2 381**
2	13	632	0	8	66	**720**
3	102	258	23	46	565	**994**
4	347	1 855	104	1 175	742	**4 224**
5	124	270	11	0	73	**479**
$1'_{m+1}Z^A$	**711**	**3 642**	**618**	**1 230**	**2 596**	**8 797**

Nota: los encabezados de fila son (1) primarios renovables, (2) primarios no renovables, (3) electricidad, (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético. Los encabezados de columna son (APM) agropecuario, pesca y minería; (Ind.) industrial; (C) construcción; (Trans.) transporte, y (Serv. y comercio) servicios y comercio.

Tabla 1.11. Coeficientes técnicos

B^A	APM	Ind.	C	Trans.	Serv. y comercio
1	0,05	0,26	0,20	0,00	0,48
2	0,02	0,88	0,00	0,01	0,09
3	0,10	0,26	0,02	0,05	0,57
4	0,08	0,44	0,02	0,28	0,18
5	0,26	0,57	0,02	0,00	0,15

Nota: los encabezados de fila son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético. Los encabezados de columna son (APM) agropecuario, pesca y minería; (Ind.) industrial; (C) construcción; (Trans.) transporte, y (Serv. y comercio) servicios y comercio.

del sistema económico al sistema energético, es decir, los coeficientes técnicos que caracterizan a los flujos económicos de los sectores que consumen energía se utilizan para estimar los consumos energéticos interindustriales. Por esta razón, argumento que se trata de una aplicación indirecta del MPI que abordaré en detalle en un capítulo posterior.

El consumo final de energía se obtiene de los balances energéticos especificado por fuente de energía como detallo en la tabla 1.12.

Así, los requerimientos energéticos intersectoriales del sistema se definen como $\mathbf{E}^{P}=\widehat{\mathbf{f}}^{PA}\mathbf{B}^{A}$ en la tabla 1.13.

De acuerdo con esta estimación, el sector industrial ecuatoriano consume el 41 % de los recursos energéticos, la mayor parte son derivados de petróleo. Los servicios y las actividades comerciales consumen el 25 % de la energía; el transporte, el 22 %, y el 12 % restante, en las actividades agropecuarias, pesqueras, mineras, y en la construcción. En el agregado nacional se consumen 87 Mbep, de los cuales 67 Mbep corresponden a derivados de petróleo. Las fuentes renovables son apenas 3 Mbep del consumo total. La electricidad es la segunda fuente energética de la economía nacional, de esta fuente, durante 2016, se consumieron 15 Mbep.

Las emisiones de CO_2 se obtienen a partir de los coeficientes de emisión de OLADE (2017), los cuales pueden explicarse como indicativos de la intensidad de las emisiones de CO_2 ($\mathbf{IECO_2}$), por cada unidad de energía empleada, en este caso se hallan detallados por sector y fuente en Kg de CO_2/TJ en la tabla 1.14. Uso como factor de conversión para este cálculo 5,8066 TJ/Kbep.

Se estiman emisiones de CO_2 por 30 585 Gg, que por fuente se localizan principalmente en los derivados de petróleo, que abarcan el 92 % del total. Estos valores se obtienen al estimar la matriz $\mathbf{ECO_2}=[\mathbf{f}^{PA}_{ms} \times \mathbf{ieco_2}_{ms}]$ y a partir de esta tanto el vector $\mathbf{ECO_2 1}_S$ como el vector $\mathbf{e}=\left[\frac{(\mathbf{ECO_2 1}_s)_{m+1}}{(\mathbf{E}^P\mathbf{1}_n)_{m+1}}\right]$, que en conjunto determinan el total de emisiones de CO_2 por unidad de energía que se ha consumido. Presento estos valores en la tabla 1.15.

Finalmente, la distribución de las emisiones de CO_2 por fuente entre los distintos sectores económicos que se describen en la tabla de utilización (tabla 1.16) se obtiene a partir de $\mathbf{CO_2}=\hat{\mathbf{e}}\,\mathbf{E}^P$.

Estos datos muestran que el sector industrial concentra la mayor parte de las emisiones. Se calcula que estas alcanzan 13 186 Gg de CO_2, correspondiente al 43 % del total, lo cual se explica por el alto consumo de derivados de petróleo que caracteriza a la industria nacional. El transporte es el segundo sector responsable de la generación de emisiones con un 26 % del total. Cabe anotar que los datos que he expuesto sirven para explicar las emisiones de CO_2 asociadas a los requerimientos energéticos interindustriales, es decir, requerimientos energéticos del consumo intermedio. Por ello, es información que difiere de la estructura del consumo final, a partir de la cual se determina que el transporte abarca el 63 % de las emisiones de CO_2.

Estos resultados no se pueden contrastar con las cifras que presenta Buenaño (2017) porque corresponden a periodos de análisis distintos, 2013 y 2016, y porque los factores de conversión para el cálculo de emisiones de CO_2 también difieren entre ambos estudios.

Tabla 1.12. Consumo final de energía (10^6 bep)

F^{PA}	Trans.	Ind.	Resid.	Com., serv., público	APM	C y otros	NE	f^{PA}	Ajustes	Total
1	0,00	1,93	1,49	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42	0,00	3,42
2	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	-0,14	0,18
3	0,01	5,81	4,40	3,08	0,00	1,26	0,00	14,56	-0,28	14,27
4	44,28	6,23	6,19	2,63	0,83	6,47	0,00	66,62	0,59	67,21
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,73	1,73	0,00	1,73
Total	**44,28**	**14,29**	**12,08**	**5,70**	**0,83**	**7,73**	**1,73**	**86,64**	**0,16**	**86,81**

Fuente: OLADE (2016).
Nota: los encabezados de fila son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético. Los encabezados de columna son (Trans.) transporte; (Ind.) industrial; (Resid.) residencial; (Com., serv., público) comercial, servicios, público; (APM) agropecuario, pesca y minería; (C y otros) construcción y otros, y (NE) no energético.

Tabla 1.13. Consumo interindustrial de energía (10^6 bep)

E^P	APM	Ind.	C	Trans.	Serv. y comercio	E^P1_n
1	0,18	0,90	0,69	0,00	1,65	**3,42**
2	0,01	0,28	0,00	0,00	0,03	**0,32**
3	1,49	3,78	0,34	0,67	8,26	**14,56**
4	5,47	29,27	1,65	18,54	11,71	**66,62**
5	0,45	0,97	0,04	0,00	0,26	**1,73**
$1'_{m+1}E^P$	**7,59**	**35,20**	**2,72**	**19,22**	**21,91**	**86,64**

Nota: los encabezados de fila son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo y (5) sector no energético. Los encabezados de columna son (APM) agropecuario, pesca y minería; (Ind.) industrial; (C) construcción; (Trans.) transporte, y (Serv. y comercio) servicios y comercio.

Tabla 1.14. Intensidad de emisiones de CO_2 (ton CO_2/TJ)

$IECO_2$	Trans.	Ind.	Resid.	Com., serv., público	APM	C. y otros	NE
Petróleo	0	76	0	76	76	76	36
Gas natural	64	50	53	53	50	64	37
Caña	42	97	0	0	97	0	0
Leña	93	93	93	93	93	93	0
Gas licuado	68	68	68	68	68	68	12
Gasolina/alcohol	73	48	50	48	48	73	15
Kerosene/*jet fuel*	74	69	70	70	70	69	14
Diésel	77	70	75	75	77	77	37
Fuel oil	76	74	76	76	74	76	38
No energético	36	28	0	0	0	18	33

Fuente: OLADE (2017).
Nota: los encabezados de columna son (Trans.) transporte; (Ind.) industrial; (Resid.) residencial; (Com., serv., público) comercial, servicios, público; (APM) agropecuario, pesca y minería; (C y otros) construcción y otros, y (NE) no energético.

Tabla 1.15. Emisiones de CO2 por fuente

Fuente	ECO_21_S Gg CO_2	E^P1_n 10^6 bep	e $GgCO_2/10^6$ bep
1	1 883	3	551
2	93	0,3	289
3	0	15	0
4	28 277	67	424
5	333	2	193
Total	**30 585**	**87**	**353**

Nota: los encabezados numéricos son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético.

Tabla 1.16. Emisiones de CO_2 intersectoriales (Gg de CO_2)

Fuente	APM	Ind.	C	Trans.	Serv. y Comercio	CO_2
1	99	495	379	0	909	**1 883**
2	2	82	0	1	9	**93**
3	0	0	0	0	0	**0**
4	2 320	12 421	698	7 869	4 968	**28 277**
5	86	188	8	0	51	**333**
$1'_{m+1}CO_2$	**2 507**	**13 186**	**1 085**	**7 870**	**5 937**	**30 585**

Nota: los encabezados de fila son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo, y (5) sector no energético. Los encabezados de columna son (APM) agropecuario, pesca y minería; (Ind.) industrial; (C) construcción; (Trans.) transporte, y (Serv. y Comercio) servicios y comercio.

Tabla 1.17. Flujos energéticos (10^6 bep)

	1	2	3	4	5	6	Z^P1_n	f^P	x^P
1	0,00	0,00	14,29	0,13	1,93	0,00	**16,35**	1,49	**17,84**
2	0,00	0,76	6,83	59,31	0,32	0,00	**67,22**	1,64	**69**
3	0,00	0,00	2,45	0,00	5,81	4,34	**12,60**	4,12	**17**
4	0,00	0,00	11,95	3,02	6,23	54,20	**75,41**	6,78	**82**
$1_m'Z^P$	**0,00**	**0,76**	**35,51**	**62,47**	**14,29**	**58,55**	**171,58**	**14,03**	**185,60**
is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00			
w^P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
e^P	0,00	0,00	16,14	1,81	0,00	0,00			
x^{PE}	**17,84**	**68,86**	**16,73**	**82,19**	**14,29**	**58,55**			

Nota: los encabezados numéricos son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad, y (4) derivados de petróleo, (5) industria y (6) los demás.

Tabla 1.18. Cuentas satélite $\tilde{S}^P$ y participación de las cuentas satélites en la oferta total $\tilde{D}^S$ (10^6 bep)

$\tilde{S}^P$	1	2	3	4	5	6
is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00
w^P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
e^P	0,00	0,00	16,14	1,81	0,00	0,00

$\tilde{D}^S$	1	2	3	4	5	6
$\tilde{d}_1^S(is^P)$	1,00	1,00	0,14	1,09	0,00	0,00
$\tilde{d}_2^S(w^P)$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\tilde{d}_3^S(e^P)$	0,00	0,00	-0,86	0,09	0,00	0,00

Nota: La explicación detallada de estos cálculos se puede revisar en la sección de los métodos de balanceo del capítulo 3, en el cual desarrollo el método de precios implícitos. Los encabezados de columna son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

La matriz insumo-producto energética para los modelos híbridos

La matriz insumo-producto en unidades físicas que derivo para desarrollar los modelos híbridos comprende una estructura diferente, pues se incorporan los sectores económicos del consumo energético en la tabla de flujos intersectoriales. En cambio, el sector no energético se analiza como parte del consumo final. Como resultado tengo una matriz de dimensión $\mathbf{m \times n}$, con $\mathbf{n = m + s = 6}$ sectores, entre los cuales $\mathbf{m = 4}$ son los sectores energéticos que he analizado: 1) fuentes renovables, 2) fuentes no renovables, 3) electricidad y 4) derivados de petróleo; y $\mathbf{s = 2}$ son los siguientes sectores económicos: 1) industria y 2) los demás. Esta matriz figura en la tabla 1.17.

La matriz de cuentas satélites $\tilde{S}^P$ se obtiene a partir de la contabilización de los insumos netos que comprenden los recursos primarios, las importaciones netas, la variación neta de inventarios y los recursos no aprovechados. Los residuos y las emisiones se obtienen como ítems de balance. Con estos datos se puede obtener la matriz de coeficientes técnicos de los flujos ecológicos $\tilde{D}^S$ que permite recuperar los flujos ecológicos del sistema conforme el siguiente cálculo: $\tilde{D}^S=\tilde{S}^P(\widehat{x^{PE}}-\mathbf{1'}_m\widehat{Z^P})^{-1}$ (tabla 1.18).

Comentarios finales

En este capítulo he estudiado a profundidad el método de la energía primaria incorporada para la estimación de una matriz insumo-producto energética. El concepto que fundamenta este desarrollo permite describir y reconocer que la producción de cada unidad de energía secundaria que se genera en el sistema requiere de una inversión proporcionalmente mayor de energía primaria. Aunque este desarrollo es interesante para evaluar el grado de eficiencia de los sistemas y evidenciar la cantidad de energía primaria que se requiere movilizar para poner en funcionamiento un sistema, existen dos limitaciones en su aplicación y en la interpretación de sus resultados.

En primer lugar, los resultados dependen de la estructura del sistema de precios implícitos desde el cual se desarrolla, esto introduce un conjunto importante de incertidumbre respecto del significado de los flujos energéticos que se estiman. En segundo lugar, se

omiten algunas categorías de productos que son útiles para describir los intercambios intersectoriales que explican buena parte del consumo energético. Por esta razón, luego de evaluar los resultados del planteamiento original del modelo, propongo algunas redefiniciones y ajustes para cuantificar adecuadamente las interrelaciones sectoriales y el consumo final, que, además, guardan consistencia con el principio de conservación. Asimismo, estas permiten consolidar un balance de entradas y salidas de energía, útil para la aplicación de los métodos insumo-producto que se desarrollarán en los siguientes capítulos.

Capítulo 2
Modelo de unidades híbridas

En esta sección describo la versión contemporánea del modelo de unidades híbridas sobre la base de la descripción del método presentada por Miller y Blair (2009), cuya versión original fue planteada por Bullard y Herendeen (1975). Se denomina a esta formulación como *unidades híbridas* porque combina en la tabla de transacciones los flujos físicos de la economía. En algunos casos se pueden combinar unidades de masa o de energía con los flujos económicos medidos en unidades monetarias.

¿Por qué estudiar este modelo? Existen varias formas de estimar una matriz insumo-producto en términos físicos. Los modelos de unidades híbridas tienen una ventaja fundamental porque consolidan en un solo marco analítico los flujos físicos y los monetarios sin perder de vista la dimensión de cada una de estas cuentas, por lo tanto, reconocen su importancia en el sistema económico.

Este capítulo lo desarrollo en cinco partes. En la primera expongo una revisión conceptual respecto de los modelos de unidades híbridas, sus fundamentos y supuestos básicos, así como también una breve revisión de la literatura más relevante para su estudio e interpretación. En la segunda parte presento las fuentes de información y el procesamiento necesario de los datos. En la tercera parte describo detalladamente el método, lo que supone en primer lugar la exposición del modelo insumo-producto tradicional de Leontief, que constituye la base del método de unidades híbridas. En la cuarta sección exploro una variante del método para registrar las condiciones de eficiencia energética que caracterizan al sistema. En la última sección desarrollo los comentarios finales del capítulo.

Marco conceptual y revisión del estado del arte

La contraparte del análisis insumo-producto económico, de manera general, puede concebirse desde el análisis insumo-producto físico. El mecanismo que hace posible el empleo de esta herramienta analítica de la economía en el campo de la economía ecológica y la ecología industrial es el principio del balance de conservación.

Merciai y Heijungs (2014) explican que en el marco de matrices insumo-producto de balance idéntico entre los totales de filas y columnas, cada unidad de producción debe hallarse balanceada, lo que significa que los insumos sean iguales a los productos. Esta regla

debería ser simultáneamente válida para cualquier unidad de medida conservada, es decir, que no exista exceso o escasez en una unidad de producción. Esto se cumple para la materia, la energía y también para el dinero, lo cual significa que las filas y las columnas de una matriz insumo-producto pueden constituir sectores económicos y/o sectores ambientales, por lo tanto, la matriz describe los intercambios entre estos componentes (De Bruyn 2000).

Es decir, tal como en el enfoque económico, la perspectiva física puede plantearse desde el empleo de una única unidad de medida para describir los intercambios entre los sectores industriales de un sistema económico. Esta condición satisface el principio de balance entre los totales de filas y columnas en la tabla insumo-producto, porque se pueden sumar tanto las filas como las columnas de la matriz sin dificultad respecto del manejo de una sola unidad de medida y desde un procesamiento similar al que se aplica en el método tradicional de Leontief. No obstante, la matriz insumo-producto física, conocida como *Physical Input-Output Table* (PIOT por sus siglas en inglés), no es simplemente una conversión de unidades desde una *Monetary Input-Output Table* (MIOT por sus siglas en inglés).

Hubacek y Giljum (2003) explican que no se puede derivar la PIOT simplemente por la multiplicación de la MIOT con un vector que describa los precios por unidad física de cada sector, debido a que existen inconsistencias en la agregación de sectores/productos no homogéneos en cada categoría.

Considero que la razón principal de esta imposibilidad se encuentra detrás del principio de conservación que debe verificarse en cada flujo que comprende la matriz insumo-producto física y para el tipo de intercambio al que se hace referencia. No es lo mismo el intercambio de flujos energéticos para satisfacer los requerimientos del sistema económico que el intercambio de flujos energéticos para satisfacer las necesidades del proceso de transformación de la energía primaria en secundaria. En ambos casos argumento que se aplica el principio de conservación, pero se trata de sistemas esencialmente distintos, con flujos distintos. Este principio suele obviarse con la sola aplicación de un método basado en la conversión de unidades como es el caso de los precios implícitos, también conocido como método de las intensidades energéticas, que abordaré en el siguiente capítulo.

Otro aspecto que marca una diferencia importante es la incorporación al sistema de PIOT de "flujos de recursos que no tienen valor económico" (Hubacek y Giljum 2003, 139). Es decir, además de la producción económica y los servicios que se valoran en la matriz monetaria, también se incorporan a la PIOT las fuentes de energía o los materiales que sirven de insumos para el procesamiento económico, además de los residuos que se descartan o a veces (muy pocas veces) se reutilizan tras el procesamiento.

El método insumo-producto de unidades híbridas, también conocido como método de unidades mixtas, es introducido en la literatura a partir de los trabajos de Chapman (1973, 1974), Wright (1973, 1974) y Bullard y Herendeen (1975) para enriquecer el marco analítico que empezó a construirse desde la década de 1960 al combinar unidades físicas con monetarias (Daly 1968; Isard 1969), o los modelos propiamente físicos de Ayres y Kneese (1969) y de Leontief (1970).

La formulación de unidades híbridas del modelo insumo-producto define coeficientes físicos que pueden ser energía o diversos materiales como minerales, agua, contaminantes,

residuos, o incluso los usos del suelo (Duchin y Lange 1994; Duchin 1998; Suh 2004; Griffin 1976; United Nations et al. 2003; Nakamura y Kondo 2009; Schmidt et al. 2010; Towa, Zeller y Achten 2000; Tukker et al. 2009; Hubacek y Sun 2001). Estos flujos inherentemente componen un conjunto de condiciones de conservación, las cuales son equivalentes en términos analíticos a garantizar la consistencia interna de la contabilidad de los flujos físicos en la economía.

Sin embargo, este método tendría dos inconvenientes característicos. El primero se centraría en su incapacidad de satisfacer el principio del balance de masa en columnas porque se formula desde varias unidades de medida que no se pueden agregar en este sentido. El segundo sería la disponibilidad de información sobre interacciones sectoriales en unidades físicas. Un aspecto adicional que puede observarse, aunque es un problema que caracteriza a cualquier modelo insumo-producto que sirva para analizar temas ambientales, se refiere a agregar sectores con alta heterogeneidad en sus características económicas y ambientales (Lenzen 2011), en particular aquellos sectores con un alto requerimiento de recursos.

A pesar de estas dificultades, los modelos de unidades híbridas permiten abordar cuestiones más complejas (Suh y Kagawa 2009) y útiles para construir políticas públicas porque muestran resultados consistentes con el principio de conservación. Algunos estudios destacados de este tipo se pueden identificar en Holanda, sobre flujos de minerales metálicos (Konijn, de Boer y van Dalen 1997; Hoekstra 2003); en Australia, sobre flujos de materiales en industrias básicas en un modelo dinámico (Lennox et al. 2004), y en la Unión Europea, sobre el uso del suelo (Hubacek y Giljum 2003). Los flujos de energía y carbón en el comercio internacional son analizados, por ejemplo, en Brasil por Machado, Schaeffer y Worrell (2001). Existe, además, una línea de investigación que combina el método de unidades híbridas con flujos de materiales y análisis de descomposición estructural (Hawkins et al. 2007).

Fuentes de información y procesamiento de los datos

Uso dos fuentes de información para el procesamiento de los datos necesarios para desarrollar el modelo de unidades híbridas. La información económica proviene de las tablas de utilización que publica el Banco Central del Ecuador, mientras que la energética se construye a partir de los balances de energía que publica la OLADE de acuerdo con el procesamiento descrito en el capítulo anterior.

Ahora explicaré el procesamiento necesario a partir de la tabla de utilización. El primer paso es identificar las categorías de recursos energéticos contrastables con las fuentes de energía disponibles en el balance energético, conforme el detalle en la tabla 2.1.

La información económica correspondiente a estas categorías de recursos energéticos no será empleada directamente en las estimaciones de la matriz insumo-producto física. En este caso, las cuentas monetarias sirven para estimar la sección económica que complementa la matriz híbrida. En efecto, en la tabla de utilización del Banco Central

del Ecuador se detalla por filas información para 278 productos, y por columnas, 71 industrias.[1] Por filas se puede identificar, por ejemplo, el uso de caña de azúcar distribuido entre 71 industrias. Sin embargo, por columnas, esta categoría no existe; en su lugar, el cultivo de caña de azúcar forma parte de la industria denominada cultivo de oleaginosas e industriales.

Tabla 2.1. Categorías de recursos energéticos contrastables con las fuentes de energía disponibles en el balance energético

Tabla de utilización				Balance energético
CPCN	**Productos**	**CPCN**	**Industrias**	
004002007	Caña de azúcar	004002	Cultivo de oleaginosas e industriales	Caña de azúcar
006001001	Madera sin elaborar	006001	Silvicultura, extracción de madera y actividades relacionadas	Leña
009001001 009001002	Petróleo crudo Gas natural	009001	Extracción de petróleo crudo y gas natural	Petróleo Gas natural
024001001 024001002	Gasolinas Naftas y gasolina natural	024001	Fabricación de productos refinados de petróleo y de otros	Gasolina/alcohol
024001003	Diésel			Diésel
024001004	*Fuel oil*			*Fuel oil*
024001006	Otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes)			Kerosene/*jet fuel*
024001007 033002002	Gases de hidrocarburos Gas de productos diferentes al petróleo y distribución de gas por tuberías			Gas licuado y otros
024001009	Otros productos y subproductos de petróleo; coque y alquitrán			Otras secundarias
033001001	Energía eléctrica	033001	Generación, captación y distribución de energía eléctrica	Hidroenergía
033001002	Servicios de transmisión y distribución eléctrica	033002	Captación, depuración y distribución de agua y saneamiento	Electricidad

Nota: CPCN (clasificación de productos de cuentas nacionales).

[1] No empleo de manera directa la matriz insumo-producto del Banco Central del Ecuador porque la información no se halla suficientemente desagregada para analizar sectores específicos que requiero, como expliqué en el caso de productos tales como la caña de azúcar.

La información económica que requiero corresponde a las unidades monetarias asociadas al resto de la industria de cultivo de oleaginosas e industriales, puesto que la matriz híbrida contará las unidades energéticas de caña de azúcar empleadas por distintos sectores a partir de los datos del balance energético. Entonces, corresponde que desagregue esta industria entre el cultivo de caña de azúcar y el resto de los cultivos de este sector en particular. En otras palabras, preciso una desagregación de las industrias para reflejar la información de los sectores energéticos y no energéticos de las distintas categorías de la matriz de unidades híbridas, procedimiento que se realiza para todos los casos detallados en la tabla 2.1.

La desagregación propuesta se realiza sobre la base de los coeficientes técnicos que se calculan para cada una de las categorías que se busca desagregar, a estos casos los noto con el supraíndice **d** de la siguiente forma:

$$\beta_{ij}^{d} = \frac{\mathbf{z}_{ij}^{d}}{\mathbf{x}_{i}^{d}}$$

Los coeficientes técnicos para la desagregación de categorías económicas así definidos se computan para todos los sectores industriales detallados en la tabla 2.1, sobre la base del valor de la oferta total $\mathbf{x}_i^d$ que se conoce para cada producto **i** (puesto que conozco la oferta total para 278 productos y 71 industrias). Utilizo este mismo coeficiente técnico para cada producto que se busca desagregar dentro de una misma industria. Por ejemplo, β_{ij}^{d} sirve tanto para el petróleo crudo como para el gas natural, de los que se conoce la oferta total como industria y también como productos diferenciados. Además, el consumo interindustrial de las categorías que desagrego $\mathbf{z}_{ij}^d$ se define por el producto entre el coeficiente técnico correspondiente y la oferta total del producto por desagregar como detallo a continuación:

$$\mathbf{z}_{ij}^{d} = \mathbf{x}_{i}^{d}\, \beta_{ij}^{d}$$

Este desarrollo se justifica en que, por construcción, una matriz insumo-producto asume que la demanda de insumos producidos por el sector **j** desde otros sectores durante un año está estrechamente ligada a la cantidad de bienes producidos por el sector **i** durante el mismo periodo (Miller y Blair 2009). Por ejemplo, la evolución de la producción en la industria textil puede explicarse en gran medida desde la demanda de telas. Los coeficientes técnicos exhiben la proporción fija con la que se define esa relación, que se caracteriza por mostrar retornos constantes de escala, es decir, el aumento de los insumos proporcional al aumento de la producción.

Con este procedimiento se desagregan las industrias correspondientes para definir 12 categorías de recursos energéticos, según se detalla en la tabla 2.1. Estos cálculos garantizan que las filas y las columnas representan los mismos sectores en la matriz insumo-producto, pues la suma del valor agregado bruto se puede inferir por diferencia entre la oferta total y el consumo interno sectorial (el total de las columnas en la matriz interindustrial) o a través de los coeficientes técnicos.

Siguiendo con el ejemplo del sector de extracción de petróleo crudo y gas natural, busco desagregarlo en las dos categorías de recursos que contiene. Los datos de la oferta

total están dados así: 8926 millones y 69 millones de dólares para petróleo crudo y gas natural, respectivamente. Se aplican los coeficientes técnicos de la categoría general a sus componentes, y se obtiene la distribución del uso de estos dos sectores para 277 productos, conforme el extracto que detallo en la tabla 2.2.

El segundo paso en el procesamiento de la tabla de utilización comprende generar categorías análogas horizontal y verticalmente. Para ello, además de los registros de 12 recursos energéticos que ya he explicado, se realiza una agregación sectorial que permite generar registros de 17 sectores (o industrias) a partir de 277 productos, se sigue la codificación CPCN a seis dígitos. Con ello, obtengo una matriz insumo-producto monetaria para cada periodo anual de análisis que contiene registros para 17 sectores, en dólares constantes de 2007 (pc).

En este caso no ajusto la categoría de otros combustibles y aceites de petróleo (incluye lubricantes) para distinguir el uso energético del no energético, como hice en el modelo de energía primaria incorporada del capítulo previo, pues en la matriz híbrida se utilizan solamente los flujos energéticos de este rubro y no los monetarios.

Tabla 2.2. Extracto de la tabla de utilización. Ecuador 2016 (10^3 $ 2007, pc)

CPCN	Industrias / Productos	9001	9001	9001001	9001002
		Extracción de petróleo crudo y gas natural	Coeficiente técnico	Petróleo crudo	Gas natural
		(a)	(b) = a/e	(c) = bxf	(d) = bxg
9002001	Servicios relacionados con el petróleo y gas natural	1 266 061	0,1408	1 256 391	9 670
35002001	Servicios de reparación y mantenimiento de vehículos de motor y motocicletas	239 628	0,0266	237 798	1 830
37001002	Servicios de transporte de carga por carretera	167 100	0,0186	165 824	1 276
37001004	Servicios de transporte por tubería	293 019	0,0326	290 781	2 238
37001005	Servicios de transporte por vía acuática	101 227	0,0113	100 454	773
42001005	Servicios de arquitectura, ingeniería y análogos	214 435	0,0238	212 797	1 638
271	Las demás categorías	1 181 495	0,1314	1 172 471	9 024
i'Z		**3 462 965**	**0,3850**	**3 436 517**	**26 448**
Valor agregado bruto		5 531 317	0,6150	5 489 071	42 246
Oferta total		**8 994 282**	**1,0000**	**8 925 588**	**68 694**
		(e)		(f)	(g)

Nota: CPCN (clasificación de productos de cuentas nacionales).

Método

En esta sección describo detalladamente el método de unidades híbridas para la estimación de una matriz insumo-producto física. Inicio explicando el modelo básico de Leontief, cuya estructura sirve de base y se replica en el desarrollo del método que pretendo estudiar en este capítulo. En la segunda parte de esta sección presento los elementos fundamentales del método de unidades híbridas, que incluye algunas claves para construir, manejar e interpretar matrices que combinan distintas unidades de medida. Finalmente, en la tercera parte expongo el desarrollo de la condición de conservación que permite garantizar la consistencia del sistema de insumos y productos.

El modelo insumo-producto tradicional

El punto de partida es el modelo básico de Leontief que describe los intercambios entre **n** sectores productivos o industrias de una determinada área económica de análisis, sea esta una ciudad, una región, un país u otros. Las transacciones interindustriales de esta unidad de análisis generalmente representan flujos de productos que tienen lugar en el transcurso de un año y se encuentran expresados en unidades monetarias.

Las transacciones interindustriales identifican la dependencia que existe entre diferentes sectores económicos, la cual es medida a través de los flujos económicos que se intercambian. En efecto, aunque la producción de la industria textil ecuatoriana puede expresarse en 2307 millones de dólares de 2007 en el año 2018, esta no se puede explicar sin los obreros, las telas, hilos, la energía eléctrica, etc. que representan 648 millones de dólares de 2007 en insumos empleados para generarla. Es decir, cada industria depende de un conjunto de insumos o bienes producidos por otras industrias o por la naturaleza para producir sus propios bienes o productos. Estas interacciones se sintetizan en tres matrices básicas que componen el modelo de Leontief: la matriz de transacciones interindustriales **Z**, la matriz de coeficientes técnicos **A** y la inversa de Leontief **L**, todas de dimensión **n** × **n**. Estas matrices las explico a continuación.

Esta notación responde al criterio de emplear mayúsculas para las matrices y minúsculas para vectores. Los elementos de una matriz los notaré con subíndices de la letra minúscula que corresponda a la matriz. Por ejemplo, los datos de consumo intermedio serán $\mathbf{z}_{ij}$, en donde **i,j=1,...,n** corresponden a los sectores económicos analizados. Los elementos de un vector los notaré también con un subíndice que indicará la fila o columna a la que se refiere la información. Por ejemplo, los elementos del vector de la oferta total serán $\mathbf{x}_i$.

La matriz de transacciones interindustriales expone por filas la distribución de la producción de cada sector en la economía, es decir, las cantidades de los bienes o servicios que produce y oferta cada sector tanto para sí mismo como para otros sectores. En otras palabras, por filas se muestra la información de los productores o sectores de origen; por columnas, en cambio, la información de los sectores de destino o compradores, es decir, los insumos que requiere cada sector para su producción.

La identidad contable básica del modelo plantea que el consumo intermedio (el valor económico de los insumos productivos) más la demanda final (las compras que realizan los consumidores o usuarios finales, que incluye las exportaciones) deben, en conjunto, integrar la oferta total. Esto se expresa así:

$$\mathbf{Z1}_n + \mathbf{f} = \mathbf{x}$$

Donde **f** es el vector de demanda final (que puede distribuirse entre la demanda interna $\mathbf{f}^d$ y la exportación $\mathbf{f}^x$), **x** es el vector de oferta total y $\mathbf{1}_n$ es un vector unitario para operar la identidad contable. Los tres vectores mencionados tienen dimensión $\mathbf{n \times 1}$. Hasta aquí solamente he expuesto una lectura horizontal del modelo.

La lectura vertical requiere incorporar el valor de los factores de la producción que notaré como el vector **l**. Este vector contendrá el valor agregado bruto que incluye las remuneraciones al trabajo, al capital y los impuestos netos (BCE 2014). Utilizo en el análisis la tabla de utilización que comprende tanto el componente nacional como el importado de las transacciones intersectoriales, por lo tanto, las importaciones se hallan incluidas en la matriz **Z**.

El vector **l** es de dimensión $\mathbf{1 \times n}$ y se suma a las transacciones interindustriales $\mathbf{1'}_n\mathbf{Z} = \sum_i^n \mathbf{z}_{ij}$ para definir la oferta total del sistema económico (pero en su versión de vector columna. Por esta razón, es necesario transponer a dicha suma):

$$(\mathbf{1'}_n\mathbf{Z} + \mathbf{l})' = \mathbf{x}$$

La representación de las transacciones así descritas se encuentra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Representación de las transacciones interindustriales

		Compradores				Demanda final		Oferta total
		Sector 1	Sector 2	⋮	Sector n	f^d	f^x	x
Vendedores	Sector 1	z_{11}	z_{12}	⋮	z_{1n}	f_1^d	f_1^x	x_1
	Sector 2	z_{21}	z_{22}	⋮	z_{2n}	f_2^d	f_2^x	x_2
	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮	⋮	⋮	⋮
	Sector n	z_{n1}	z_{n2}	⋮	z_{nn}	f_n^d	f_n^x	x_n
Remuneraciones al trabajo		l_1	l_2	⋮	l_n	Producto interno bruto (PIB)		
Retribución a los activos y empresas								
Impuestos sobre la producción								
Oferta total		x_1	x_2	⋮	x_n			

La matriz de transacciones interindustriales **Z** se puede definir a partir de coeficientes técnicos. Los coeficientes técnicos son un conjunto de parámetros que definen los requerimientos de insumos del sector **i** necesarios para producir una unidad del producto **j**. Notaré la matriz de coeficientes técnicos como **A**, de dimensión **n** × **n**, los cuales se asumen como fijos durante el periodo de análisis y se determinan por la fracción de insumos de cada tipo en la oferta total, o, en otros términos, los requerimientos directos de insumos para generar la oferta total:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

Donde $\hat{\mathbf{x}}$ corresponde a una matriz diagonal de dimensión **n** × **n** conformada por los elementos de la oferta total.

Al seguir las convenciones del modelo tradicional insumo-producto, los parámetros definidos en **A** permiten operar el modelo desde una relación lineal de la siguiente forma:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$$

La matriz inversa de Leontief, que notaré como **L**, de dimensión **n** × **n**, se compone de un conjunto de coeficientes que determinan los requerimientos directos e indirectos de insumos. Se puede derivar como detallo a continuación:

Considero	$\mathbf{Z1}_n + \mathbf{f} = \mathbf{x}$
Reemplazo $\mathbf{Z}=\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$:	$\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{1}_n + \mathbf{f} = \mathbf{x}$
Se puede demostrar que $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{1}_n=\mathbf{x}$, entonces:	$\mathbf{Ax} + \mathbf{f} = \mathbf{x}$
Despejo **x**:	$\mathbf{x} - \mathbf{Ax} = \mathbf{f}$
	$(\mathbf{I}_n-\mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{f}$
	$\mathbf{x} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}$
Defino la matriz inversa de Leontief como	$\mathbf{L} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$

En este marco de análisis se pueden estudiar los efectos directos e indirectos de posibles cambios en la demanda final. Se trata de impactos en el sistema económico que serán expresados tanto en términos de cambios en la oferta total como también en los flujos interindustriales que describe la matriz insumo-producto.

Por un lado, los efectos directos se interpretan como aquellos que corresponden al primer vínculo intersectorial y por ello se miden en función de la matriz de coeficientes técnicos **A**. Así, el requerimiento directo de insumos se cuantifica como la proporción de los distintos insumos en relación con la oferta total de cada sector. Por otro lado, los requerimientos totales, que incluyen los requerimientos directos e indirectos de insumos, se calculan a partir de la matriz inversa de Leontief $\mathbf{L} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$.

Una forma de analizar este aspecto es a través de la serie geométrica de matrices que define esta matriz:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{L}$$

Para demostrar esta igualdad, se puede partir de la expansión de la serie geométrica:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h = \mathbf{A}^0 + \mathbf{A}^1 + \mathbf{A}^2 + \ldots$$

Puesto que $\mathbf{A}^0 = \mathbf{I}_n$:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h = \mathbf{I}_n + \sum_{h=1}^{\infty} \mathbf{A}^h$$

Al extraer **A** como factor común en la última expresión:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h = \mathbf{I}_n + \mathbf{A}\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h$$

Reordeno esta expresión y para ello llevo el término $\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h$ siempre al lado izquierdo de la ecuación:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h - \mathbf{A}\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h = \mathbf{I}_n$$

Extraemos $\sum_{h=0}^{\infty} A^h$ como factor común:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}) = \mathbf{I}_n$$

Multiplico ambos lados de la expresión por $(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$ para despejar la serie geométrica:

$$\sum_{h=0}^{\infty} \mathbf{A}^h = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{L}$$

A partir de aquí, puedo interpretar que **L** contiene no solo los efectos directos medidos por **A**, sino que además cuenta por efectos indirectos de intercambios subsecuentes al sumar la serie geométrica de la matriz de coeficientes técnicos. Con estos elementos, los requerimientos totales del sistema, que incluyen los directos e indirectos por unidad de demanda final, se podrán expresar así:

$$\mathbf{x} = \mathbf{Lf}$$

El modelo de unidades híbridas

En esta sección describo el método de unidades híbridas que permite construir una matriz que combina unidades monetarias con unidades físicas para el análisis de los flujos energéticos. Para tal propósito, sigo principalmente el desarrollo propuesto por Miller y Blair (2009), con ligeros cambios que menciono de manera específica cuando así se requiera.

El propósito de este modelo es definir los análogos de las tres matrices básicas del modelo de Leontief, es decir, las equivalencias híbridas a las matrices **Z, A y L**. Esto significa una matriz de transacciones intersectoriales que medirá tanto flujos de energía como monetarios, además de exhibir los insumos económicos y energéticos del sistema, una matriz de requerimientos económicos y energéticos directos y, por último, una matriz de requerimientos económicos y energéticos totales.

Uso como notación el superíndice **P** para distinguir a las matrices de flujos físicos que se corresponden conceptualmente a categorías similares de flujos monetarios. Dejo estas últimas sin superíndice. Es decir, la matriz de flujos energéticos intersectoriales corresponderá a $\mathbf{Z}^{P}$, mientras que mantendré la notación **Z** para la matriz monetaria que describe los flujos correspondientes.

La matriz de flujos energéticos $\mathbf{Z}^{P}$, cuya dimensión es $\mathbf{m} \times \mathbf{n}$, muestra los intercambios que van desde los productores de energía hacia los consumidores con **m** sectores que proveen energía. El vector de suministro energético para la demanda final lo noto como $\mathbf{f}^{P}$, cuya dimensión es $\mathbf{m} \times \mathbf{1}$. Finalmente, el vector de consumo energético final, de dimensión $\mathbf{m} \times \mathbf{1}$ lo identifico como $\mathbf{x}^{P}$. La identidad análoga al modelo tradicional de Leontief en unidades físicas es la siguiente:

$$\mathbf{Z}^{P}\mathbf{1}_{n} + \mathbf{f}^{P} = \mathbf{x}^{P}$$

Para expresar los intercambios en unidades híbridas se toma la matriz monetaria de transacciones interindustriales **Z** y se reemplaza las filas de sectores energéticos por los valores de la correspondiente matriz de flujos energéticos $\mathbf{Z}^{P}$, para definir una nueva matriz de transacciones **Z***, cuyas filas muestran sectores energéticos valorados en unidades físicas y sectores no energéticos valorados en unidades monetarias. De manera similar se construyen los vectores de producción total **x*** y de demanda final **f*** que corresponden. Por último, el vector **g*** valora únicamente los insumos físicos del sistema (idénticos a la oferta energética total de cada sector) y es cero para el resto de los casos. Formalmente, estas matrices se definen así:

$$\mathbf{Z}^{*}_{nxn} = [\mathbf{z}^{*}_{ij}] = \begin{cases} \mathbf{z}_{ij} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector no energético} \\ \mathbf{z}^{P}_{ij} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

$$\mathbf{f}^{*}_{nx1} = [\mathbf{f}^{*}_{i}] = \begin{cases} \mathbf{f}_{i} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector no energético} \\ \mathbf{f}^{P}_{i} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{*}_{nx1} = [\mathbf{x}^{*}_{i}] = \begin{cases} \mathbf{x}_{i} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector no energético} \\ \mathbf{x}^{P}_{i} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

$$\mathbf{g}^{*}_{nx1} = [\mathbf{g}^{*}_{i}] = \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector no energético} \\ \mathbf{x}^{P}_{i} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

De esta forma, el modelo de unidades híbridas combina elementos físicos y elementos monetarios. Para los valores no nulos de $\mathbf{g}^*$, los insumos energéticos son iguales a los productos energéticos en cada sector, esto significa que $\mathbf{g}_i^* = \mathbf{x}_i^*$, para los sectores energéticos $\mathbf{i = m+1, ..., n}$, por lo tanto, $\mathbf{g}_i^* = \mathbf{x}_i^* = \mathbf{x}_i^P$ en esos sectores. Este supuesto, como se verá más adelante, determina un modelo de eficiencia energética que no muestra "pérdidas" en la conversión. Una variante de esta versión básica del modelo permite relajar este supuesto y analizar de forma menos restrictiva las condiciones de eficiencia que caracterizan al sistema.

La identidad contable básica de equilibrio en este modelo es:

$$\mathbf{Z}^* \mathbf{1}_n + \mathbf{f}^* = \mathbf{x}^*$$

Las matrices $\mathbf{A}^* = \mathbf{Z}^* (\hat{\mathbf{x}}^*)^{-1}$ y $\mathbf{L}^* = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^*)^{-1}$ tienen dimensión $\mathbf{n \times n}$ y se expresan en unidades mixtas. Se derivan en un proceso similar al explicado en el caso del modelo de Leontief tradicional como detallo a continuación:

Considero	$\mathbf{Z}^* \mathbf{1}_n + \mathbf{f}^* = \mathbf{x}^*$
Reemplazo $\mathbf{Z}^* = \mathbf{A}^* (\hat{\mathbf{x}}^*)$:	$\mathbf{A}^* (\hat{\mathbf{x}}^*) \mathbf{1}_n + \mathbf{f}^* = \mathbf{x}^*$
Se puede demostrar que $(\hat{\mathbf{x}}^*) \mathbf{1}_n = \mathbf{x}^*$, entonces:	$\mathbf{A}^* \mathbf{x}^* + \mathbf{f}^* = \mathbf{x}^*$
Despejo $\mathbf{x}^*$:	$\mathbf{x}^* - \mathbf{A}^* \mathbf{x}^* = \mathbf{f}^*$
	$(\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^*) \mathbf{x}^* = \mathbf{f}^*$
	$\mathbf{x}^* = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{f}^*$
Defino la matriz inversa de Leontief en unidades híbridas:	$\mathbf{L}^* = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^*)^{-1}$

A pesar de la similitud de la estructura del modelo de unidades híbridas con respecto al modelo tradicional de Leontief, algunas propiedades del modelo original carecen de sentido en este contexto debido a la combinación de unidades de medida. Por ejemplo, la suma de los elementos de cada columna de $\mathbf{A}^*$. Para los sectores energéticos estos valores definen unidades físicas por cada dólar de la producción, en cambio, para los no energéticos corresponden al valor en dólares de los insumos por cada dólar de la producción.

Condición de conservación

Se busca definir una matriz equivalente a la inversa de Leontief,[2] que notaré como α, de dimensión $\mathbf{m \times n}$, la cual contenga los coeficientes de requerimientos energéticos totales para cubrir la oferta total de energía:

$$\mathbf{x}^P = \alpha \mathbf{f}$$

[2] Hay que recordar que en el modelo de Leontief una forma de definir la oferta total puede ser así: $\mathbf{x = Lf}$ o $\mathbf{x} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}$.

Con este propósito, introduzco en este punto la condición de conservación de la energía que opera para todos los sectores económicos **j**, basándome en la adaptación propuesta por Miller y Blair (2009) del trabajo de Herendeen (1974). De acuerdo con esta condición, la energía incorporada en la producción de cada sector económico $\mathbf{x}_j$ ($\mathbf{j = 1, ..., n}$) debe ser igual a la cantidad de energía incorporada en todos los insumos económicos $\mathbf{z}_{ij}$ ($\mathbf{i = 1, ..., n}$) que requiere el sector económico **j**, más los insumos energéticos $\mathbf{g}^*_{kj}$ ($\mathbf{k = 1, ..., m}$) que requiere cada sector **j**:

$$\alpha_{kj}\mathbf{x}_j = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ki}\mathbf{z}_{ij} + \mathbf{g}^*_{kj}$$

Donde

- α_{kj} Cantidad de energía del tipo **k** que se requiere para la producción de un dólar del sector **j**.
- $\mathbf{x}_j$ Producto total en dólares del sector **j**.
- $\mathbf{z}_{ij}$ Insumo del sector **i** en dólares, que consume el sector **j**.
- $\mathbf{g}^*_{kj}$ Producto energético total del sector **k**. Hay que recordar que se asume que existe eficiencia energética y, por lo tanto, los insumos son iguales a los productos.

La matriz **G**, que completa la condición de conservación, se define por la oferta total de energía cuando **k=j** para **m** sectores energéticos y **n** sectores económicos:

$$\mathbf{G}_{mxn} = [\mathbf{g}^*_{kj}] = \begin{cases} \mathbf{x}^p_k & \text{cuando } \mathbf{k} = \mathbf{j} \text{ y } \mathbf{k} \text{ es un sector energético} \\ \mathbf{0} & \text{los demás casos} \end{cases}$$

En términos matriciales, la condición de conservación de la energía se puede expresar así:

$$\alpha\hat{\mathbf{x}} = \alpha\mathbf{Z} + \mathbf{G}$$

Reemplazo $\mathbf{Z} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$: $\alpha\hat{\mathbf{x}} = \alpha\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{G}$

Reordeno $\alpha(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{G}$

$$\alpha(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}$$

$$\alpha(\mathbf{I}_n - \mathbf{A}) = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

En términos de los requerimientos energéticos totales del sistema, la condición de conservación se formula de la siguiente forma:

$$\alpha = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$$

Donde $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$ representa un coeficiente de intensidad energética de la oferta, es decir, cuántas unidades de energía se requieren por cada dólar de la producción económica que se oferta al mercado. La inversa de Leontief, $\mathbf{L} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$, permite ajustar este coeficiente por los requerimientos directos e indirectos de insumos para cubrir las necesidades de la economía. En estos términos, α representa la cantidad de energía total que se requiere de forma directa e indirecta para producir el valor de un dólar de la oferta total del sector **i**.

Para el modelo de unidades híbridas, la condición de equilibrio antes descrita, $\alpha\hat{\mathbf{x}} = \alpha\mathbf{Z} + \mathbf{G}$ se expresa así:

$$\alpha^{H}\hat{\mathbf{x}}^{*} = \alpha^{H}\mathbf{Z}^{*} + \mathbf{G}$$

Con un procesamiento similar al que realicé, se tiene que:

$$\alpha^{H} = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}\,(\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^{*})^{-1}$$

Mantengo la definición de **G**, que ya he explicado antes, esto es:

$$\mathbf{G}_{mxn} = [\mathbf{g}^{*}_{kj}] = \begin{cases} \mathbf{x}^{p}_{k} & \text{cuando } \mathbf{k} = \mathbf{j} \text{ y } \mathbf{k} \text{ es un sector energético} \\ \mathbf{0} & \text{los demás casos} \end{cases}$$

Aunque Miller y Blair (2009) sugieren que $\mathbf{g}^{*}_{kj}$ debe corresponder únicamente a la oferta total de los sectores primarios, que son los únicos "productores" de energía en el sistema, noto que esta definición no permite cumplir la condición de conservación planteada. Por esta razón, utilizo la definición más amplia de **G**, que incluye la valoración de fuentes primarias y secundarias de energía.

Para aislar a los sectores energéticos en el modelo de unidades híbridas, se puede obtener el producto $\mathrm{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}$. Por construcción, esta será una matriz compuesta por ceros y unos. En efecto, la ratio entre $\mathbf{g}^{*}_{k}$ y $\mathbf{x}^{*}_{k}$ será 1 para los sectores energéticos. Hay que recordar que cuando $\mathbf{k} = \mathbf{j}$ y $\mathbf{k} = \mathbf{1},\ldots, \mathbf{m}$, entonces $\mathbf{g}^{*}_{k} = \mathbf{x}^{*}_{k} = \mathbf{x}^{P}_{k}$. Esto significa que, en un modelo de retornos energéticos constantes de escala, no se puede interpretar el producto $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}$ como un factor de intensidad energética. En su lugar, los valores unitarios de la matriz resultante anunciarán la posición de los sectores energéticos. Si este producto premultiplica a $\mathbf{L}^{*} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^{*})^{-1}$, se obtiene la matriz de coeficientes energéticos totales α^{H}, que incluye los requerimientos directos e indirectos de energía. Si el producto $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}$ premultiplica a la matriz $\mathbf{A}^{*}$, se obtiene la matriz de coeficientes energéticos directos δ^{H}, que solo incluye los requerimientos directos de energía:

$$\alpha^{H} = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}\mathbf{L}^{*}$$

$$\delta^{H} = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}\mathbf{A}^{*}$$

Una modificación importante que se introduce con esta versión de las matrices de requerimientos energéticos directos y totales es que esta vez δ^H y α^H abarcan los efectos asociados a los sectores económicos, que en el caso de δ y α se omitían. Estas dos matrices, sin embargo, por construcción representan coeficientes, por lo tanto, no se hallan medidas en unidades energéticas absolutas o relativas. La interpretación de los requerimientos energéticos directos y totales se puede realizar en unidades energéticas a partir de $\delta^H \hat{\mathbf{x}}^*$ y $\alpha^H \hat{\mathbf{x}}^*$. En términos relativos a la oferta económica se puede utilizar una construcción similar a la que se emplea en el caso del modelo de precios implícitos, que denominaré $\varepsilon^H=(\alpha^H \hat{\mathbf{x}}^*)\ \hat{\mathbf{x}}^{-1}$, la cual mide los requerimientos energéticos del sistema por cada dólar de la oferta económica.

Finalmente, en este modelo debería verificarse el cumplimiento de la siguiente identidad contable básica:

$$\mathbf{x}^P = \alpha^H \mathbf{f}^*$$

Una variante del modelo de unidades híbridas para estudiar la eficiencia energética del sistema

El método de unidades híbridas se puede aplicar con una variante para reflejar el grado de eficiencia en la conversión energética, es decir, qué cantidad de insumos energéticos primarios y secundarios se requiere invertir para generar la producción de cada unidad de energía que se origina en esa fuente. Cabe anotar que no solamente se invierten fuentes primarias, sino también secundarias en la transformación. Así, por ejemplo, las centrales eléctricas no solo emplean gas natural, hidroenergía y otras fuentes primarias (como residuos orgánicos que se obtienen a partir de procesos biológicos e industriales de la agricultura, ganadería, etc.) para generar electricidad, sino también diésel, *fuel oil* y otras energías secundarias.

Esta variante del modelo de unidades híbridas supone una modificación en el valor de $\mathbf{x}_k^*$ de manera que refleje, de ser el caso, la existencia de pérdidas en la conversión de energía. Para ello, estimo la cantidad de energía requerida como insumo para la producción en las condiciones de eficiencia energética que caracterizan al sistema. El recálculo de $\mathbf{x}_k^*$ notaré como $\mathbf{x}_k^{**}$. Llamaré $\mathbf{x}_k^{**}$ a la oferta energética ajustada por las condiciones de eficiencia. La obtención de $\mathbf{x}_k^{**}$ parte de reconocer que $\mathbf{g}_k^* \neq \mathbf{x}_k^{**}$. Ahora, calculo el vector $\mathbf{g}^{**}$, cuyos valores no-nulos se asignarán como $\mathbf{g}^{**}= \alpha^{**}\mathbf{f}^* \neq \mathbf{x}^P$, es decir, los insumos energéticos totales del sistema $\mathbf{g}_k^{**}$ ya no se definen más a partir de la oferta energética $\mathbf{x}_k^P$. Los insumos energéticos se podrán definir así:

$$\mathbf{g}^{**}_{nx1} = [\mathbf{g}_k^{**}] = \begin{cases} 0 & \text{si } \mathbf{k} \text{ es un sector no energético} \\ \sum_{j=1}^{n} \alpha_{kj}^{**} \mathbf{f}_j^* & \text{si } \mathbf{k} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

Es decir,

$$\mathbf{g}^{**}_{nx1} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{n} \alpha^{**}_{1j} f^{*}_{j} \\ \sum_{j=1}^{n} \alpha^{**}_{2j} f^{*}_{j} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{n} \alpha^{**}_{kj} f^{*}_{j} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{n} \alpha^{**}_{mj} f^{*}_{j} \\ \mathbf{0}_{n-m} \end{bmatrix}$$

Al ser $\mathbf{0}_{n-m}$ un vector columna con ceros de dimensión $(\mathbf{n} - \mathbf{m}) \times \mathbf{1}$.

Los cambios en $\mathbf{x}^{**}_{k}$ originan una modificación en la matriz de coeficientes técnicos de unidades híbridas $\mathbf{A}^{*}$ y en la matriz inversa de Leontief con unidades híbridas $\mathbf{L}^{*}$. Esta vez calcularé estas matrices, como detallo a continuación y, para distinguirlas de las matrices del modelo básico de unidades híbridas, agregaré un asterisco adicional en la notación:

$$\mathbf{A}^{**} = \mathbf{Z}^{*} (\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$$

$$\mathbf{L}^{**} = (\mathbf{I}_{n} - \mathbf{A}^{**})^{-1}$$

La matriz α^{**} muestra los coeficientes de requerimientos totales de energía del sistema para el modelo híbrido. Esta matriz resultará de considerar las condiciones de eficiencia energética del sistema, conforme el detalle del cálculo de $\mathbf{x}^{**}$ que he planteado:

$$\alpha^{**} = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1} \mathbf{L}^{**}$$

En este caso, el producto $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ muestra, por construcción, el coeficiente de eficiencia energética definido por el cociente entre la inversión energética y el producto energético π_{k}, que explicaré a continuación. Por ahora cabe indicar que una forma de interpretar este factor es identificarlo con el tipo de retornos energéticos de escala que caracteriza al modelo. En este caso, al ser los valores de la diagonal distintos de 1 indica que no se asumen retornos constantes.

La matriz δ^{**} que muestra los coeficientes de requerimientos directos de energía en el modelo híbrido ajustado por la eficiencia energética se calculará así:

$$\delta^{**} = \mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1} \mathbf{A}^{**}$$

Es preciso notar que estos cambios no afectan la definición de $\mathbf{x}^{*}_{k} = \mathbf{x}^{p}_{k}$ para los sectores energéticos, y tampoco la construcción de la matriz **G**, cuyos elementos $\mathbf{g}^{*}_{kj}$ describen para **k = j** la oferta total de energía de cada fuente **k = 1, ..., m**:

$$\mathbf{G}_{mxn} = [\mathbf{g}^{*}_{kj}] = \begin{cases} \mathbf{x}^{p}_{k} & \text{si } \mathbf{k} = \mathbf{j} \text{ y } \mathbf{k} \text{ es un sector energético} \\ \mathbf{0} & \text{los demás casos} \end{cases}$$

En esta versión del modelo, el uso de la notación $\mathbf{g}^{*}_{kj}$ para los elementos de esta matriz puede ser confuso. Debe observarse que en condiciones de ineficiencia energética estos elementos son distintos a los definidos en $\mathbf{g}^{**}$.

Finalmente, la condición de conservación que se verifica en este sistema será:

$$\alpha^{**}\hat{\mathbf{x}}^{**} = \alpha^{**}\mathbf{Z}^{*} + \mathbf{G}$$

A fin de comparar con los resultados del modelo de precios implícitos, podré contrastar los requerimientos energéticos en términos absolutos, sean los totales $\alpha^{**}(\hat{\mathbf{x}}^{**})$ o los directos $\delta^{**}(\hat{\mathbf{x}}^{**})$, y en términos relativos a la oferta total a partir de $\varepsilon^{**} = (\alpha^{**}\hat{\mathbf{x}}^{**})\,\hat{\mathbf{x}}^{-1}$.

Intuitivamente en esta variante del modelo se trata de reconocer que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, la ley de la entropía, una parte de la inversión energética no se puede transformar en energía secundaria útil, sino que se "pierde" al convertirse en calor disipado. Advierto una "pérdida" porque no se trata más de energía útil para el trabajo. Sin embargo, de acuerdo con el primer principio de la termodinámica, el principio de conservación, la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. En este caso la energía útil se transforma en calor disipado una vez que es procesada en los distintos sistemas de transformación.

A veces la eficiencia energética se interpreta como la capacidad de ahorro de un sistema, es decir, como la capacidad de producir iluminación, calor o realizar un trabajo utilizando la menor cantidad de energía (López 2016, 4; CEPAL, OLADE y BID 2019). Desde la entropía, en cambio, la lectura que se propone no es una de ahorro, sino del costo energético de la producción, que puede ser creciente por las pérdidas que tienen lugar durante el proceso de transformación.

La ruptura de la igualdad entre $\mathbf{g}^{*}_{k}$ y $\mathbf{x}^{*}_{k}$ para **k = 1, ..., m** que caracteriza a la versión original del modelo de unidades híbridas permite poner en evidencia el carácter entrópico del sistema $\mathbf{g}^{*}_{k} > \mathbf{x}^{**}_{k}$ desde una variante del modelo que introduce la valoración de $\mathbf{x}^{**}_{k}$. Esta variante evidencia de manera general el concepto de eficiencia energética, al contrastar sus dos componentes fundamentales en cualquier definición: los insumos y los productos energéticos asociados a las diferentes fuentes. Para ello, empleo los indicadores disponibles en el balance energético del Ecuador preparado por la OLADE, conforme los cuales se detallan cifras del procesamiento en refinerías, centrales eléctricas, autoproductores, centros de gas y destilerías. No considero, sin embargo, el procesamiento en otros tipos de centros de transformación como biodigestores, por ejemplo, porque las fuentes primarias de energía que los alimentan no se contabilizan en las cuentas económicas, por lo que no se pueden identificar categorías equiparables en términos monetarios y físicos.

En síntesis, contrasto las divergencias entre insumos y productos energéticos a partir de la evaluación de los procesos de transformación, es decir, $\mathbf{g}_k^T \neq \mathbf{x}_k^T$. El supraíndice **T** señala que me centro solamente en recursos de la transformación por la disponibilidad y alcance que permiten las fuentes de información. Es preciso indicar que estos vectores son análogos a aquellos que he notado antes con dos asteriscos, es decir, guardan una misma estructura que esos vectores, pero aplicados a la información disponible.

Futuras investigaciones podrán centrarse en definiciones más amplias de eficiencia energética que incluyan –además de la energía que se consume y aquella que se produce como parte del propio proceso de transformación– la inversión energética requerida para establecer y mantener la infraestructura necesaria para generar o transportar los combustibles hasta los puntos de uso. No obstante, todavía existe un debate al respecto de estas ampliaciones, de manera que los resultados podrían no ser siempre comparables (Hall, Balogh y Murphy 2009; Hall, Lambert y Balogh 2014; Lambert et al. 2014; Murphy, Rapoport y Parco 2004).

Con estos elementos computo la eficiencia en la transformación para cada fuente secundaria, a partir de la inversión energética de la transformación, que notaré como π_k, que se mide por la ratio:

$$\pi_k = \frac{\mathbf{g}_k^T}{\mathbf{x}_k^T}$$

La inversión energética mide cuántas unidades de insumos energéticos se invierten por cada unidad de energía que se produce. Mientras más alta es la inversión de insumos, menos eficiente será el sistema. El retorno energético será el inverso de la inversión, es decir $\frac{1}{\pi_k}$. El retorno energético indica cuántas unidades de energía se generan por cada unidad que se invierte en dicha generación. Un sistema será eficiente si produce más energía de la que requiere como inversión, es decir, si $\frac{1}{\pi_k} > 1$ o, en otros términos, muestra retornos de escala energéticos crecientes. Interpretaré, en cambio, que el sistema presenta retornos de escala energéticos constantes si $\frac{1}{\pi_k} = 1$, tal como asumo en la versión inicial del modelo, aunque así se omite la realidad entrópica que caracteriza a los sistemas. Por último, el sistema ineficiente o no rentable, desde un punto de vista energético, será aquel que exhiba retornos decrecientes de escala, con $\frac{1}{\pi_k} < 1$.

Dadas estas definiciones, la oferta energética ajustada por las condiciones de eficiencia $\mathbf{x}_k^{**}$ que se calcula para las fuentes secundarias se determinará así:

$$\mathbf{x}_k^{**} = \frac{1}{\pi_k} \cdot \mathbf{x}_k^{*}$$

En efecto, un sistema que requiere π_k insumos por cada unidad de energía que produce solamente podrá generar una fracción $\frac{1}{\pi_k}$ de la oferta actual $\mathbf{x}_k^{*}$ (con los insumos $\mathbf{g}_k^{*}$ que se hallan disponibles). Este resultado permite definir $\mathbf{x}_k^{**}$ y recalcular la matriz $G(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$. Hay que recordar que en la versión original del modelo de unidades híbridas $G(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ es una matriz de unos y ceros, que en su composición binaria identifica con unos a las

posiciones de los sectores energéticos, las cuales también se pueden interpretar como un esquema de retornos de escala energéticos constantes. En esta variante del modelo, el cálculo de $G(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ en cada una de estas posiciones no nulas indicaría la eficiencia energética que corresponde a cada fuente. Los elementos de $G(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ mayores a 1 implican que los requerimientos de insumos energéticos son proporcionalmente mayores a la producción energética factible. Por el contrario, los elementos de $G(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ menores a 1 identifican una producción energética eficiente porque se usan proporcionalmente menos insumos de los que se producen.

Mi lectura de la eficiencia energética mide los productos asociados a los insumos que se emplean en el sistema. Pongo en consideración el caso de los centros de gas. Estos producen 599 Kbep de gasolinas y alcoholes. Por el coeficiente técnico de esta producción, se sabe que es equivalente al uso de 671 Kbep de gas natural. La inversión energética de la producción de gasolinas y alcoholes corresponde, por lo tanto, a 671/599 = 1,12. Es decir que por cada unidad que se genera de estas fuentes secundarias de energía se requiere de una inversión de 1,12 unidades energéticas y, por lo tanto, un retorno energético de 0,89. Para definir la eficiencia del sistema en el caso de las gasolinas y alcoholes se suman los procesamientos en refinerías y destilerías, con lo cual se obtiene un producto de 12 193 Kbep y un insumo de 12 552 Kbep. Son características de un sistema muy cercano a los retornos de escala energéticos constantes, con una inversión de 1,03 unidades energéticas por cada unidad que se produce, lo que en términos de retorno implica que por cada unidad que se invierte se obtiene un producto energético de 0,97 unidades de energía.

En la tabla 2.4 se pueden analizar estas relaciones, que constituyen un extracto de las estimaciones de eficiencia energética que realizo para los diferentes centros de transformación y fuentes secundarias.

Para el caso de las fuentes primarias de energía, considero un esquema de retornos constantes de escala. En efecto, se trata de recursos energéticos cuyas pérdidas de eficiencia se registran en los productos energéticos secundarios. En aquellos casos en que no existe la información necesaria para calcular la eficiencia, aplico un valor de 1 por defecto.

Tabla 2.4. Insumos y productos energéticos de la transformación (10^3 bep)

Fuentes	Centros de gas		Otros centros		Total transformación		Eficiencia energética
	Ins.	Prod.	Ins.	Prod.	g_k^T	x_k^T	$\pi_k = g_k^T / x_k^T$
Gas natural					0	0	1,00
Gasolina/alcohol	671	599	11 881	11 594	12 552	12 193	1,03
Gas licuado y otros	1 197	1 070	1 315	1 276	2 512	2 346	1,07
Otras			79 345	61 745	79 345	61 745	1,29
Total	**1 868**	**1 669**	**92 541**	**74 615**	**94 409**	**76 284**	**1,24**

Nota: (Ins.) insumo y (Prod.) producto.

En mis estimaciones de esta variante del modelo se registra un sistema de retornos decrecientes de escala para todas las fuentes. Esto significa que verifico que $\mathbf{g}_k^* > \mathbf{x}_k^*$. Estos resultados se obtienen al incorporar a esta variante del modelo de unidades híbridas el grado de eficiencia energética que caracteriza al sistema a partir del recálculo de $\mathbf{x}_k^*$.

Para interpretar los resultados, asumo por un momento que parto de centros de autoproductores de electricidad energéticamente neutrales, con retornos de escala energéticos constantes. En mi ejemplo, la producción de 2956 Kbep de electricidad debería ser posible a partir de una inversión de 2056 Kbep de las diversas fuentes de energía primarias y secundarias. Es decir, en una relación cercana a 1:1. En su lugar, calculo que este sistema produce con un retorno muy bajo, de 0,32:1, porque utiliza 9326 Kbep en dicha producción.

La producción de electricidad en centrales eléctricas, en cambio, muestra mejores condiciones. La relación que existe es 0,59:1 porque se utilizan 23 811 Kbep para generar 13 967 Kbep. Esto equivale a decir que si hipotéticamente se utiliza como insumo toda la oferta energética de electricidad que el sistema tiene disponible, esto es 16 725 Kbep, se podrá ofertar solamente $\mathbf{x}_k^{**} = 8542$ Kbep. La diferencia en la oferta energética muestra la pérdida en la conversión debido a la ineficiencia característica de este procesamiento. A partir de este cálculo puedo interpretar que si la producción de energía en la transformación es solamente el 51 % de los insumos energéticos empleados, resulta que la oferta de electricidad ajustada constituirá también el 51 % de la oferta original, es decir, 8542:16 725 Kbep. Se puede ver que la matriz $G(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ recalculada por los retornos energéticos decrecientes mostrará en la posición de la electricidad una necesidad energética de 1,96 en lugar del valor por defecto de 1, que mostraba la versión original del modelo.

Resultados

El modelo básico en condiciones de eficiencia en la conversión

En esta sección presentaré los resultados de la aplicación del modelo de unidades híbridas para el caso ecuatoriano durante el año 2016, en una versión agregada para $\mathbf{m = 4}$ sectores energéticos más dos sectores económicos, no energéticos, que notaremos como $\mathbf{s = 2}$. En total empleo $\mathbf{n = m + s = 6}$ sectores, con fines expresamente didácticos. El objetivo es explicar la aplicación del método expuesto en la sección previa tanto en su versión original como en sus variantes. Realizo, sin embargo, una aplicación desagregada del método para el periodo comprendido entre 2010-2016 en un capítulo posterior, en el que se muestran resultados distintos a estos, porque la agregación origina una pérdida importante de información para el análisis, aunque se verifica también la consistencia con las condiciones de conservación.

Empiezo con el procesamiento de la información para obtener la matriz insumo-producto monetaria (tabla 2.5), que describe las transacciones interindustriales, la demanda final, la remuneración de los factores y la oferta total para los siguientes sectores energéticos:

1. Recursos renovables (caña de azúcar, leña, hidroenergía),
2. Recursos no renovables (gas natural y petróleo crudo),
3. Electricidad,
4. Derivados de petróleo (gasolinas y alcoholes, diésel, *fuel oil*, kerosene y *jet fuel*, gas licuado y otros gases, otras energías secundarias).

Asimismo, esta matriz describe los siguientes sectores económicos:

5. Industria,
6. Los demás (agricultura, pesca y minería; construcción; comercial, servicios, sector público; transporte y almacenamiento).

La matriz de flujos energéticos (tabla 2.6) se agrega de manera similar, aunque en este caso los sectores económicos solamente se detallan por columnas. La estimación de esta matriz la presenté en el capítulo previo, por lo que en la tabla 2.6 solamente retomo sus resultados.

La información así planteada permite verificar que se cumple la condición contable básica del modelo:

$$\mathbf{Z}^{P}\mathbf{1}_{n} + \mathbf{f}^{P} = \mathbf{x}^{P}$$

Con esta definición desarrollaré el método que comprende la construcción de las matrices y vectores de unidades híbridas $\mathbf{Z}^{*}$, $\mathbf{f}^{*}$, $\mathbf{x}^{*}$, $\mathbf{g}^{*}$ (tabla 2.7).

Ahora calculo las matrices $A^{*}=Z^{*}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}$ y $\mathbf{L}^{*} = (\mathbf{I}_{n}-\mathbf{A}^{*})^{-1}$ (tablas 2.8 y 2.9).

La condición de conservación $\alpha^{H}\hat{\mathbf{x}}^{*} = \alpha^{H}\mathbf{Z}^{*} + G$ se puede construir a partir de dos elementos: la matriz de requerimientos directos e indirectos de energía $\alpha^{H} = \mathbf{G}\,(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}(\mathbf{I}_{n} - \mathbf{A}^{*})^{-1}$ y la de oferta energética que defino como $\mathbf{G}$ (tabla 2.10), la cual permite posicionar a los sectores energéticos del sistema. Hay que recordar que el factor $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}$ identifica el tipo de retornos energéticos que caracterizan al sistema. En esta versión básica del modelo de unidades híbridas asumo que $\mathbf{g}^{*}_{k} = \mathbf{x}^{*}_{k}$, entonces obtengo retornos energéticos constantes de escala, es decir, la matriz $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}$ se compone de valores unitarios para los sectores energéticos y ceros para los demás sectores. Esta estructura será diferente para el modelo que asume retornos decrecientes de escala.

Resta solamente estimar $\alpha^{H} = \mathbf{G}\,(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}\mathbf{L}^{*}$ y $\delta^{H} = \mathbf{G}\,(\hat{\mathbf{x}}^{*})^{-1}\mathbf{A}^{*}$, que permite distinguir los coeficientes de requerimientos energéticos totales α^{H} de los directos δ^{H} (tabla 2.11).

En general, como tendencia en los resultados del modelo, debería observarse que la suma de los coeficientes energéticos de las fuentes secundarias se aproxima a la suma de los coeficientes de las fuentes energéticas primarias al descontar las pérdidas en la conversión que pueden tener lugar. Escribo esta diferencia en la última línea de la matriz α^{H}. Este patrón, sin embargo, no tiene lugar en el caso de las energías primarias porque estas extraen su energía desde fuera del sistema económico que analizo, es decir, desde la naturaleza.

Tabla 2.5. Matriz insumo-producto (10^6 $ 2007)

	1	2	3	4	5	6	$Z1_n$	f	x
1	430	80	734	0	626	510	**2 381**	295	**2 676**
2	24	13	42	628	4	8	**720**	8 274	**8 994**
3	49	31	84	3	256	572	**994**	1 343	**2 338**
4	156	180	259	1 731	395	1 965	**4 686**	1 120	**5 806**
5	119	352	123	35	9 105	11 305	**21 039**	25 406	**46 446**
6	223	2 807	184	89	7 456	15 711	**26 471**	50 115	**76 586**
$1'_nZ$	**1 003**	**3 463**	**1 426**	**2 485**	**17 841**	**30 072**	**56 291**	**86 554**	**142 845**
l	1 673	5 531	911	3 320	28 604	46 514			
x'	**2 676**	**8 994**	**2 338**	**5 806**	**46 446**	**76 586**			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.6. Flujos energéticos (bep 10^6)

	1	2	3	4	5	6	Z^P1_n	f^P	x^P
1	0,00	0,00	14,29	0,13	1,93	0,00	**16,35**	1,49	**17,84**
2	0,00	0,76	6,83	59,31	0,32	0,00	**67,22**	1,64	**68,86**
3	0,00	0,00	2,45	0,00	5,81	4,34	**12,60**	4,12	**16,73**
4	0,00	0,00	11,95	3,02	6,23	54,20	**75,41**	6,78	**82,19**
$1'_mZ^P$	**0,00**	**0,76**	**35,51**	**62,47**	**14,29**	**58,55**	**171,58**	**14,03**	**185,60**
is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00			
w^P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
e^P	0,00	0,00	16,14	1,81	0,00	0,00			
$(x^P)'$	**17,84**	**68,86**	**16,73**	**82,19**	**14,29**	**58,55**			

Nota: los encabezados numéricos son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.7. Transacciones intersectoriales. MUH

	Z*	1	2	3	4	5	6	f*	x*	g*
10^6 bep	**1**	0	0	14	0	2	0	1	18	18
10^6 bep	**2**	0	1	7	59	0	0	2	69	69
10^6 bep	**3**	0	0	2	0	6	4	4	17	17
10^6 bep	**4**	0	0	12	3	6	54	7	82	82
10^6 $	**5**	119	352	123	35	9 105	11 305	25 406	46 446	0
10^6 $	**6**	223	2 807	184	89	7 456	15 711	50 115	76 586	0

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.8. Coeficientes directos. MUH

A*	1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,01	0,41	0,72	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,71	0,04	0,00	0,00
5	6,69	5,11	7,38	0,42	0,20	0,15
6	12,53	40,77	11,01	1,08	0,16	0,21

Tabla 2.9. Coeficientes totales. MUH

L*	1	2	3	4	5	6
1	1,00	0,01	1,02	0,01	0,00	0,00
2	0,01	1,05	1,19	0,79	0,00	0,00
3	0,00	0,01	1,19	0,01	0,00	0,00
4	0,02	0,05	0,96	1,08	0,00	0,00
5	11,98	17,39	46,56	13,91	1,31	0,26
6	19,03	57,63	104,27	44,87	0,30	1,36

Nota: los encabezados de las tablas 2.8 y 2.9 son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.10. Oferta energética (10^6 bep). MUH

G	1	2	3	4	5	6
1	18	0	0	0	0	0
2	0	69	0	0	0	0
3	0	0	17	0	0	0
4	0	0	0	82	0	0

$G(\hat{x}^*)^{-1}$	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0

Nota: los encabezados numéricos de las matrices **G** y $G(\hat{x}^*)^{-1}$ son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.11. Coeficientes de requerimientos energéticos totales y directos. MUH

α^H	1	2	3	4	5	6
1	1,00	0,01	1,02	0,01	0,00	0,00
2	0,01	1,05	1,19	0,79	0,00	0,00
3	0,00	0,01	1,19	0,01	0,00	0,00
4	0,02	0,05	0,96	1,08	0,00	0,00
FP-FS	**1,00**	**1,00**	**0,06**	**-0,29**	**0,00**	**0,00**

δ^H	1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,01	0,41	0,72	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,71	0,04	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de las matrices son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

En estas fuentes la diferencia debe ser cercana a 1 y se interpreta que la totalidad de la energía primaria por cada dólar de la producción económica se obtiene desde fuera del sistema económico. Es un resultado lógico porque se trata de fuentes primarias de energía.

Adicionalmente, en los resultados identifico que los dos sectores energéticos secundarios muestran una pequeña diferencia entre los coeficientes energéticos primarios y secundarios. Aunque en esta versión del modelo no incluyo las pérdidas de eficiencia, mi interpretación de estos resultados es que se pueden analizar estas discrepancias como pérdidas o ganancias energéticas del sistema en los procesos de transformación. En el caso de la electricidad observo pérdidas, mientras que en el de los derivados de petróleo existen ganancias energéticas porque en este último la producción energética secundaria supera a la inversión energética en la forma de fuentes primarias.

Estos coeficientes, sin embargo, no permiten dimensionar la composición energética del sistema económico porque no se miden en unidades energéticas específicas. A fin de interpretar, se puede obtener el producto $\alpha^H\hat{\mathbf{x}}^*$ para analizar el valor absoluto de los requerimientos energéticos totales del sistema económico, o bien un valor relativo a la producción económica para comparar estos resultados con aquellos que se derivan del modelo de precios implícitos $(\alpha^H\hat{\mathbf{x}}^*)\hat{\mathbf{x}}^{-1}$.

En términos absolutos, a partir de $\alpha^H\hat{\mathbf{x}}^*$ la lectura es que la industria nacional (sector 5 en la tabla 2.12) requiere en total 70 Mbep de insumos energéticos para su operación, de los cuales 11 serían renovables, 23 no renovables, diez de electricidad y 26 de derivados de petróleo. En el agregado sectorial se requieren en total 565 bep que mido a través de $\alpha^H\hat{\mathbf{x}}^*$, de los cuales el 83 % corresponden a energías no renovables y derivados de petróleo. Asimismo, se estima que el 30 % de estos requerimientos energéticos del sistema corresponden solamente a las necesidades directas $\delta^H\hat{\mathbf{x}}^*$, esto es, 172 Mbep.

Cuando se analiza la situación desde la perspectiva de los insumos energéticos del sistema, se observa que los insumos interindustriales representan el 67 % de los requerimientos energéticos del sistema $\alpha^H\mathbf{Z}^*$, es decir, 380 Mbep de un total de 565 Mbep que se requieren para producir la oferta total del sistema.

En este caso el sistema total muestra retornos constantes de escala, por lo que se verifica la condición de conservación de energía en el sistema sin descontar pérdidas en la conversión (tabla 2.13). Asimismo, compruebo que se cumple la identidad contable básica del modelo a partir del correspondiente producto matricial $\mathbf{x}^P = \alpha^H\mathbf{f}^*$.

Una lectura adicional que presento aborda los valores relativos a la oferta económica total. Esto tiene por objeto contrastar estos resultados con aquellos que se obtendrán a partir del modelo de precios implícitos. Los resultados de la operación los denomino en analogía a la matriz de coeficientes energéticos relativos ε del modelo de precios implícitos. En este caso es $\varepsilon^H = (\alpha^H\hat{\mathbf{x}}^*)\hat{\mathbf{x}}^{-1}$ (tabla 2.14).

Para interpretar, tomaré como ejemplo el caso del sector industrial (el sector 5). La columna 5 de la matriz ε^H muestra los requerimientos totales de energía de este sector no energético de la economía ecuatoriana. El elemento $\varepsilon^H_{15} = 0{,}24$ es la necesidad energética primaria renovable de la producción industrial de la economía. Esto significa que se requieren aproximadamente 0,24 bep de energía proveniente de fuentes renovables

Tabla 2.12. Requerimientos energéticos totales (valor absoluto, 10^6 bep). MUH

$\alpha^H\hat{x}^*$	1	2	3	4	5	6
1	18	0	17	1	11	9
2	0	72	20	65	23	67
3	0	0	20	0	10	10
4	0	3	16	88	26	87
Total	**19**	77	**73**	**154**	**70**	**173**

$\delta^H\hat{x}^*$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	14	0	2	0
2	0	1	7	59	0	0
3	0	0	2	0	6	4
4	0	0	12	3	6	54
Total	**0**	**1**	**36**	**62**	**14**	**59**

Nota: los encabezados numéricos de las matrices son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.13. Condición de conservación de energía en el sistema (10^6 bep). MUH

$\alpha^H\hat{Z}^* + G$	1	2	3	4	5	6
1	0+18	0	17	1	11	9
2	0	3+69	20	65	23	67
3	0	0	3+17	0	10	10
4	0	3	16	6+82	26	87
Total	**19**	77	**73**	**154**	**70**	**173**

Nota: Los elementos de la diagonal muestran la operación de suma porque **G** es una matriz diagonal. Los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.14. Coeficientes energéticos relativos (bep/10^3 $ de 2007). MUH

ε^H	1	2	3	4	5	6
1	6,69	0,05	7,27	0,09	0,24	0,12
2	0,10	8,04	8,53	11,15	0,50	0,88
3	0,02	0,05	8,48	0,07	0,21	0,13
4	0,12	0,38	6,88	15,24	0,56	1,13
Total	**6,92**	**8,51**	**31,16**	**26,56**	**1,51**	**2,26**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.15. Coeficientes energéticos totales (bep/10^3 $ de 2007). MUH

	1	2	3	4	5	6	Total
ε^H	6,92	8,51	31,16	26,56	1,51	2,26	**76,93**
ε	6,78	1,29	21,41	21,62	1,07	1,85	**54,01**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

para producir 1000 dólares de la oferta industrial ecuatoriana, lo que incluye tanto los requerimientos directos como indirectos de energía. De manera similar, ε_{25}^{H}= **0,50** es el requerimiento energético primario no renovable de la producción industrial ecuatoriana. Finalmente, ε_{35}^{H}= 0,21 y ε_{45}^{H}= 0,56 son las necesidades energéticas secundarias de nuestra producción industrial. En total, la industria requiere 1,5 bep por cada 1000 dólares de su producción. No obstante, este es el sector con más bajos requerimientos energéticos relativos a su producción. El sector de electricidad y el de derivados de petróleo necesitan en conjunto 57,7 bep de las distintas fuentes de energía para generar el equivalente a 1000 dólares de su oferta económica. En el agregado, por cada 1000 dólares de la oferta económica de todos los sectores se requieren aproximadamente 77 bep, de los cuales el 70 % corresponden a fuentes no renovables y derivados de petróleo.

En la tabla 2.15 comparo estos resultados con los que presentaré en el modelo de precios implícitos desde el enfoque de precios no homogéneos (ε). Identifico las diferencias más significativas en los sectores de recursos no renovables (sector 2), hidroenergía (sector 3) y derivados de petróleo (sector 4). ¿Cómo se pueden explicar estas discrepancias? En principio, los métodos tienen bases analíticas diferentes. Mientras que con el método de precios implícitos se calculan las necesidades energéticas por las intensidades energéticas de los diferentes sectores, es decir, por las unidades de energía asociadas a cada dólar de la producción; en el modelo de unidades híbridas que presento aquí se calculan las necesidades energéticas propiamente dichas. En otras palabras, medidas en valores absolutos y no relativos.

Método de unidades híbridas con pérdidas en la conversión

Introduzco el cálculo de la eficiencia energética de la transformación. Presento, en la tabla 2.16, los cálculos de los insumos y productos de la transformación. Con esta información configuro un escenario de eficiencia energética que valora la inversión energética necesaria para producir una unidad de energía. Esta inversión energética la denomino π_k, que se calcula solamente a las fuentes secundarias de energía, las cuales sufren un proceso de transformación que posiblemente origina pérdidas (o ganancias) energéticas. Expongo los resultados de este escenario a continuación.

Como he explicado, el cambio fundamental que tiene lugar con la introducción de un escenario de ineficiencia en la conversión de energía es que se levanta el supuesto de que los insumos energéticos son iguales a los productos energéticos.

En este nuevo contexto se reconoce que $\mathbf{g}_k^* > \mathbf{x}_k^{**}$ para las fuentes secundarias de energía. Por ello, esta vez calculo el producto energético que se puede obtener a partir de la inversión de la energía disponible como producción en las condiciones de eficiencia que caracterizan al sistema. De esta forma, si los autoproductores de energía eléctrica emplean 9,3 Mbep como insumos energéticos y a partir de esos recursos generan un producto energético de 3,0 Mbep, se calcula que la inversión necesaria de insumos energéticos sería de 3,2 Mbep por cada unidad de energía que se produce. De invertirse la totalidad del producto energético disponible, es decir, 3,0 Mbep, se obtendría como producto energético solamente 937 Kbep bajo estas condiciones de eficiencia energética.

Tabla 2.16. Insumos y productos energéticos de la transformación (10^3 bep)

Fuentes	Refinerías		Centrales eléctricas		Autoproductores		Otros centros		Total transformación		Eficiencia energética
	Ins.	Prod.	Ins.	Prod.	Ins.	Prod.	Ins.	Prod.	g_k^T	x_k^T	$\pi_k = g_k^T/x_k^T$
Renovables	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0000
No renovables	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0000
Electricidad	0	0	23 811	13 967	9 326	2 956	0	0	33 137	16 924	1,9580
Derivados de petróleo	57 445	55 720	0	0	0	0	2 048	1 915	59 493	57 636	1,0322
Total	**57 445**	**55 720**	**23 811**	**13 967**	**9 326**	**2 956**	**2 048**	**1 915**	**92 630**	**74 559**	**1,2424**

Nota: (Ins.) insumo y (Prod.) producto.

Tabla 2.17. Transacciones intersectoriales. MUH con pérdidas en la conversión

Z*		1	2	3	4	5	6	f*	x**	g*
10^6 bep	**1**	0	0	14	0	2	0	1	18	18
10^6 bep	**2**	0	1	7	59	0	0	2	69	69
10^6 bep	**3**	0	0	2	0	6	4	4	9	17
10^6 bep	**4**	0	0	12	3	6	54	7	80	82
10^6 $	**5**	119	352	123	35	9 105	11 305	25 406	46 446	0
10^6 $	**6**	223	2 807	184	89	7 456	15 711	50 115	76 586	0

Nota: los encabezados de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.18. Coeficientes directos. MUH con pérdidas en la conversión

A**	1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	1,67	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,01	0,80	0,74	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	1,40	0,04	0,00	0,00
5	6,69	5,11	14,45	0,43	0,20	0,15
6	12,53	40,77	21,56	1,12	0,16	0,21

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Empleo este procedimiento para calcular la eficiencia energética π_k y el producto energético según el nivel de eficiencia en la transformación que corresponde a $\mathbf{x}_k^{**}$ para todo el sistema nacional. En la tabla 2.17 se puede ver que en este escenario no existen cambios en la matriz $\mathbf{Z}^*$ ni en los vectores $\mathbf{f}^*$ y $\mathbf{g}^*$. Solamente modifico el vector $\mathbf{x}^{**}$.

Calculo las matrices $\mathbf{A}^{**}=\mathbf{Z}^*(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$ y $\mathbf{L}^{**} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^{**})^{-1}$ (tablas 2.18 y 2.19).

También registro los cambios en el producto $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}$, cuya diagonal principal para los recursos energéticos muestra la eficiencia energética del sistema (tabla 2.20).

En las condiciones de eficiencia energética de este sistema los coeficientes de requerimientos energéticos totales $\alpha^{**}= \mathbf{G}\,(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}\mathbf{L}^{**}$ y directos $\delta^{**}= \mathbf{G}\,(\hat{\mathbf{x}}^{**})^{-1}\mathbf{A}^{**}$ son los que constan en la tabla 2.21.

Las diferencias entre la suma de los coeficientes energéticos primarios y la suma de los coeficientes energéticos secundarios muestran las pérdidas y ganancias energéticas que existen en los procesos de transformación de los sectores eléctrico y de los derivados de petróleo, respectivamente. Es preciso notar que estos datos son distintos a los cálculos de pérdidas en la transformación a partir del balance energético, porque ahora se toman en cuenta no solo los efectos directos, sino también los efectos indirectos de la conversión, es decir, además de la eficiencia directa, se suma la eficiencia energética que se transmite intersectorialmente. Sin embargo, para interpretar estos coeficientes en unidades energéticas se necesita operar el producto $\alpha^{**}\hat{\mathbf{x}}^{**}$ para evaluar los requerimientos totales, o $\delta^{**}\,\hat{\mathbf{x}}^{**}$ para analizar los requerimientos directos (tabla 2.22), ambos en valores absolutos o en términos relativos a través de $\varepsilon^{**} = (\alpha^{**}\hat{\mathbf{x}}^{**})\hat{\mathbf{x}}^{-1}$.

Se puede ver que en esta variante del modelo se requiere un 23 % más de energía en contraste con la versión básica: 695:565 bep. Esto significa que el esfuerzo energético necesario para cubrir la ineficiencia en la transformación que caracteriza al sistema energético ecuatoriano es de 0,23 unidades energéticas adicionales por cada unidad de energía que se produce. Ahora, en la tabla 2.23, presento resultados relativos a la oferta económica, que corresponden a: $\varepsilon^{**} = (\alpha^{**}\hat{\mathbf{x}}^{**})\hat{\mathbf{x}}^{-1}$

Con el mismo caso que analizo en el modelo básico de unidades híbridas (el sector industrial, identificado como el sector 5 de nuestras matrices), los requerimientos totales de energía de este sector, en términos relativos a la oferta, los detallo en la columna 5 de la matriz ε^{**}. Una vez que se reconoce que no existen condiciones de eficiencia energética en el sistema nacional, se identifica que por cada 1000 dólares de la oferta industrial ecuatoriana se requieren 0,49 bep de energías renovables. Esto significa algo más del doble de la energía que estimo al asumir retornos energéticos constantes de escala.

Asimismo, la relación entre los requerimientos energéticos de este modelo de retornos energéticos decrecientes de escala versus el de retornos constantes es de 1,6:1 para el caso de las fuentes no renovables de energía, 2,4:1 para los requerimientos de electricidad y de 1,5:1 para los insumos derivados del petróleo. Al sumar los requerimientos energéticos totales de la industria ecuatoriana y comparar entre ambos modelos, resulta que este sector requiere casi el doble de energía bajo un esquema de retornos decrecientes de escala en relación con uno de retornos constantes. En la tabla 2.24 presento un resumen de los principales resultados del escenario base y su variante por ineficiencia energética.

Tabla 2.19. Coeficientes totales.
MUH con pérdidas en la conversión

L**	1	2	3	4	5	6
1	1,01	0,01	2,42	0,01	0,00	0,00
2	0,02	1,06	2,90	0,82	0,00	0,00
3	0,00	0,01	1,44	0,01	0,00	0,00
4	0,02	0,06	2,30	1,09	0,00	0,00
5	12,15	17,76	111,91	14,68	1,32	0,27
6	19,43	58,48	251,64	47,07	0,32	1,38

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.20. Coeficientes de eficiencia energética.
MUH con pérdidas en la conversión

$G(\hat{x}^{**})^{-1}$	1	2	3	4	5	6
1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	1,96	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	1,03	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad, (4) derivados de petróleo, (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.21. Coeficientes de requerimientos energéticos totales α^{**} y directos δ^{**}.
MUH con pérdidas en la conversión

α^{**}	1	2	3	4	5	6
1	1,01	0,01	2,42	0,01	0,00	0,00
2	0,02	1,06	2,90	0,82	0,00	0,00
3	0,01	0,02	2,82	0,01	0,00	0,00
4	0,02	0,06	2,37	1,12	0,00	0,00
FP-FS	1,00	1,00	0,12	-0,30	0,00	0,00

δ^{**}	1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	1,67	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,01	0,80	0,74	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	1,44	0,04	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de las matrices α^{**} y δ^{**} son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.22. Requerimientos energéticos totales (valor absoluto, 10^6 bep). MUH con pérdidas en la conversión

$\alpha^{**}\hat{x}^{**}$	1	2	3	4	5	6
1	18	1	21	1	23	21
2	0	73	25	66	38	84
3	0	1	24	1	23	23
4	0	4	20	89	38	101
Total	**19**	**79**	**90**	**157**	**122**	**229**

$\delta^{**}\hat{x}^{**}$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	14	0	2	0
2	0	1	7	59	0	0
3	0	0	5	0	11	9
4	0	0	12	3	6	56
Total	**0**	**1**	**38**	**63**	**20**	**64**

Nota: los encabezados numéricos de las matrices son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.23. Coeficientes energéticos totales (bep/10^3 $ de 2007). MUH con pérdidas en la conversión

ε^{**}	1	2	3	4	5	6
1	6,71	0,11	8,84	0,18	0,49	0,27
2	0,13	8,12	10,58	11,28	0,82	1,09
3	0,05	0,12	10,32	0,17	0,50	0,31
4	0,15	0,45	8,66	15,36	0,82	1,32
Total	**7,03**	**8,79**	**38,41**	**27,00**	**2,62**	**2,99**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) recursos renovables; (2) recursos no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 2.24. Principales resultados del escenario base y su variante

Unidades	Indicador	Base	Ineficiencia energética
bep/bep	π	1,00	1,06
10^6 bep	$\alpha\hat{x}^*$	565	695
10^6 bep	$\delta\hat{x}^*$	172	186
bep/1 000 $	ε^H	77	87

Comentarios finales

El modelo de unidades híbridas constituye una base consistente con el principio termodinámico de conservación, para estudiar las interacciones en el interior del sistema energético y del sistema económico. Reviste una ventaja fundamental respecto de los modelos basados en precios implícitos porque construir los coeficientes de efectos directos y totales no requiere transitar por la incertidumbre inherente a un sistema de precios. No obstante, es preciso reconocer que los sustanciales requerimientos de información pueden suponer una limitación importante a la hora de implementar un análisis. En ese contexto, el uso de balances energéticos, que se compilan a escala nacional casi en cualquier economía del mundo, se convierte en una herramienta fundamental para desarrollar este tipo de análisis.

Capítulo 3
Modelo de precios implícitos o intensidades ecológicas

El objeto de utilizar los modelos insumo-producto es comprender el funcionamiento y la evolución de la economía desde las interacciones entre los sectores económicos que la componen. Para ello, a través de un conjunto integrado de matrices analizo el proceso de producción y la utilización de bienes y servicios.

La estructura productiva que exhiben las matrices económicas se proyecta en matrices físicas a través de precios implícitos cuando estos se definen como valores unitarios sectoriales promedio. De esta forma, la circulación intersectorial de flujos de materia, energía u otros elementos ambientales que son objeto de evaluación se puede identificar en una matriz híbrida, que conjuga en un solo marco de análisis los flujos económicos y los físicos. Los grados de articulación y las interrelaciones así modeladas reflejan solamente las cantidades de recursos físicos asociadas con las transacciones económicas en las condiciones de precios vigentes. Es posible, sin embargo, tender un puente entre las cuentas monetarias y físicas a través del método de los precios implícitos, siempre que la estructura de precios empleada refleje los intercambios ecológicos. En estas condiciones, a pesar de que los flujos ecológicos no necesariamente guardan coherencia con las transacciones económicas, las condiciones físicas del intercambio de recursos pueden modelarse desde una matriz económica, en un marco consistente con la aplicación del principio de la conservación de la materia y la energía.

En este capítulo explico el desarrollo de un modelo híbrido, conocido como método de precios implícitos o de intensidades ecológicas, cuyas formulaciones más tempranas fueron aplicadas por Strout (1967) y Bullard y Herendeen (1975). Seguiré la descripción del método planteada por Miller y Blair (2009), quienes advierten que su aplicación puede hallarse muy extendida, no obstante, su uso debe limitarse a un estrecho margen de casos en los que se cumplen condiciones de homogeneidad específicas en la estructura de precios del sistema.

Este modelo se denomina *precios implícitos* de los flujos ecológicos porque se calculan precios que no necesariamente corresponden a los que se pagan en el mercado, sino que están contenidos en los flujos económicos que caracterizan al sistema, por ejemplo, los precios por la energía que consumen los diversos sectores.

Alternativamente, este modelo también puede identificarse como uno de intensidad en el uso de recursos, por ejemplo, de intensidad energética. Esta se mide por la cantidad

de energía asociada a cada dólar que circula como parte de las transacciones económicas. Como explicaré más adelante, ambos enfoques generan resultados equivalentes, la única fuente de discrepancia puede ocurrir por la estructura de precios que se toma como base.

Varios autores han estudiado los métodos híbridos de precios implícitos, y han contrastado sus resultados con las matrices insumo-producto que se construyen desde la información física (Merciai y Heijungs 2014; Weisz y Duchin 2006; Miller y Blair 2009). De estos trabajos se obtiene como conclusión general que existe una discrepancia entre los resultados que se derivan al tomar como base una matriz física y una monetaria.

La explicación de estas discrepancias descansa en tres hipótesis principales. En la primera se identifica las causas con el tratamiento que se otorga a la cuenta de desperdicios (Suh 2004). En la segunda hipótesis, en la que coincide la mayor parte de la literatura, se atribuye el origen de las diferencias al supuesto de homogeneidad en los precios sectoriales, es decir, al empleo de precios unitarios promedio para cada sector económico (Merciai y Heijungs 2014; Weisz y Duchin 2006; Miller y Blair 2009). Finalmente, en una tercera hipótesis Merciai y Heijungs (2014) identifican inconsistencias que pueden tener lugar por la contabilización inadecuada de precios homogéneos entre productores, porque en la práctica se pueden comprobar diferencias incluso dentro de una misma categoría de producto. Estos autores ejemplifican el caso con el precio del consumo industrial de electricidad que, generalmente, es más bajo que el precio que se aplica a los pequeños consumidores.

Como consecuencia general, se plantea que la discrepancia que exhibe la matriz insumo-producto híbrida derivada de una base monetaria evidencia la violación del principio de la conservación de la materia y la energía o, en términos prácticos, determina un balance de materiales (o de energía) que incumple sus principios básicos. De esta forma, sea por la contabilización inadecuada de los residuos o de los precios heterogéneos entre productores y/o consumidores, la matriz híbrida obtenida, según la literatura existente, carecería de una suerte de "consistencia termodinámica".

En este debate me posiciono en la línea argumental que identifica al supuesto de homogeneidad de precios como fuente de discrepancias entre la matriz insumo-producto híbrida que se origina en información monetaria y aquella que se construye desde la información propiamente física. Descarto a la contabilización de residuos como elemento explicativo de inconsistencias porque, como explicaré más adelante, esta cuenta constituye un ítem de balanceo (European Commission y Eurostat 2001) que permite consolidar el equilibrio del sistema en unidades físicas, razón por la cual su evolución sería independiente de la estructura monetaria, por lo tanto, también independiente de los cambios en los precios implícitos. Asimismo, descarto diferencias originadas en la heterogeneidad de precios entre productores o dentro de las mismas categorías de productos. Explicaré a partir de un ejemplo, basado en la exposición de Merciai y Heijungs (2014), que una definición apropiada de una matriz de precios promedio permite replicar la consistencia termodinámica del principio de conservación en el balance físico que se deriva del método de precios implícitos. De hecho, demostraré que este balance será idéntico al que se obtiene desde la construcción física.

Mi aporte en estos debates, por lo tanto, comprenderá tres ámbitos. En primer lugar, la explicación integral del método y los mecanismos para su aplicación. En segundo lugar, la exposición de las condiciones en las que el método genera resultados equiparables cuando su base es información monetaria y cuando esta es física. En tercer lugar, el análisis del alcance analítico de las aproximaciones híbridas que se realizan a partir de promedios de precios unitarios sectoriales. En mi opinión, no se trata de inconsistencias termodinámicas las que se derivan de estas aplicaciones, sino de resultados que requieren lecturas diferentes.

Con estos elementos en mente, en la siguiente sección del capítulo presento una revisión conceptual. En la segunda sección expongo el método, los supuestos de base, las variables y las ecuaciones que determinan las interacciones dentro del sistema y también aquellas que definen el balance físico. En la tercera sección presento los resultados de una aplicación de esta metodología para el caso del Ecuador. Por último, en la sección final, discuto acerca de la contribución y alcance de este método.

Marco conceptual y revisión del estado del arte

En el origen de las matrices insumo-producto físicas se encuentran los desarrollos a partir del método de intensidad energética, también conocido como método de precios implícitos. Como he explicado, su principal atractivo constituye la posibilidad de construir una matriz insumo-producto en términos físicos a partir de un conjunto relativamente pequeño de información que se encuentra disponible.

En efecto, para construir una matriz de este tipo basta con disponer de un vector de precios implícitos sectoriales (o intensidades de recursos, que constituyen el valor inverso del precio; por ejemplo, Kbep de energía por dólar) y una matriz insumo-producto de las cuentas económicas, es decir, medida en dólares (mejor si estas se expresan a precios constantes). El detalle que frecuentemente puede omitirse en el proceso es la verificación de la consistencia de estos resultados con las condiciones de conservación. Precisamente, las críticas al método apuntan a este aspecto porque se aplican precios homogéneos a una estructura de intercambios que es heterogénea en esencia. Este es el origen de sesgos importantes e incertidumbre significativa respecto de los resultados que no logran resolverse desde el propio método (Chapman 1974; Dietzenbacher et al. 2009; Mattey y ten Raa 1997; Merciai y Heijungs 2014; Miller y Blair 2009; Weisz y Duchin 2006; Wright 1974).

Conceptualmente, la provisión de una unidad de un bien o servicio puede lograrse a partir de una cierta cantidad de recursos empleados, sean estos energía, materiales o agua; pero también puede tener lugar en el marco de determinadas presiones ambientales, por ejemplo, por la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) u otro tipo de contaminantes. La cantidad de recursos necesarios (o presión ambiental desplegada) es lo que define la intensidad energética o material (o intensidad de presión ambiental) que caracteriza a un bien o servicio. La productividad del recurso se medirá e interpretará de forma inversa, es decir, como el valor económico por unidad del recurso empleado como insumo.

En los años noventa y la primera década del siglo XXI, parte de la literatura se enfocó en el uso de este tipo de indicadores para debatir respecto de la desmaterialización de las economías (Cleveland y Ruth 1999; Reijnders 1998; van der Voet, van Oers y Nikolic 2005; von Weizsacker, Lovins A. y Lovins H. 1997). La desmaterialización se refiere a la reducción en la cantidad de materiales que se emplean para cumplir una tarea, de manera que sería posible desacoplar las trayectorias de uso de recursos e impactos ambientales respecto del crecimiento económico (Lifset 2009).

Los factores que pueden transformar la intensidad de los recursos se centran en los elementos constitutivos del concepto (Cleveland y Ruth 1999; Greyl et al. 2013):

1. Cambios en la tecnología de producción o en la combinación de insumos utilizados para producir los bienes y servicios. Esto incluye la reducción o la sustitución de algunos insumos, sea por razones de eficiencia productiva, producción más limpia o regulaciones estatales.
2. Cambios en la propia composición del producto o del sistema que han sido observados, por ejemplo, con la progresiva participación del sector servicios de algunas economías o con la estabilización de los patrones de crecimiento poblacional en economías maduras, cuya demanda por infraestructura y los recursos materiales que la sustentan se desacelera o incluso disminuye.

En ese contexto, uno de los primeros indicadores en aparecer fue el de intensidad material por unidad de servicio de Schmidt-Bleek (1993), quien proponía medir el uso de recursos a lo largo de toda la cadena productiva, es decir, además del proceso productivo que tradicionalmente se mide, su propuesta incluía la extracción de recursos, la disposición de desechos y el reciclaje. Este modelo se desarrolla en el presente capítulo como Método de precios implícitos (MPI).

Las principales críticas a este marco conceptual de análisis se centraron en dos aspectos. El primero, la confusión respecto del origen de una reducción en la intensidad energética, que en ocasiones puede provenir de un incremento en el valor económico de la producción (el denominador) antes que de una reducción en el uso de recursos (el numerador). Este aspecto se resuelve con el desarrollo de los análisis de descomposición de factores.

El segundo aspecto que se debate sin consenso en la literatura son los conceptos de *efecto rebote*, o paradoja de Jevons (1865), y la hipótesis de una curva de Kuznets ambiental (Auty 1985; Dinda 2004). En la paradoja de Jevons se establece que la introducción de tecnologías con mayor eficiencia energética puede ser contraproducente en términos del consumo total de energía. En estas condiciones disminuyen los costos relativos de la producción que promueven una ampliación en la escala de producción, pues esta se torna más rentable. Estos criterios han sido importantes para el desarrollo reciente de las teorías del decrecimiento. Desde esta perspectiva se ha argumentado, entre otros aspectos, que un menor impacto a escala unitaria es sistemáticamente anulado por la multiplicación de la escala agregada del consumo (Latouche 2008).

En la curva de Kuznets ambiental se establece que en las primeras etapas del desarrollo, cuando las industrias intensivas en el uso de recursos naturales predominan, el incremento de los ingresos es más importante que la inversión en protección ambiental. Por esta razón, los impactos ambientales muestran una trayectoria creciente como los ingresos per cápita. Esta situación se sostendrá hasta que alcance un punto de inflexión después del cual será prioritaria la protección ambiental en el marco de una economía que pudiera tender a ampliar el sector terciario (Kemp-Benedict 2018).

Una forma de hacer operativos estos conceptos y los debates ha sido a través de las matrices insumo-producto en unidades físicas. El desarrollo de las tablas físicas desde la intensidad de recursos se origina con trabajos como los de Strout (1967), Bullard y Herendeen (1975), Krenz (1974) y Proops (1977). Una característica común de muchos de los estudios en esta línea es el desarrollo de diferentes tipos de análisis de descomposición, probablemente porque permiten disgregar el conjunto de efectos relativos que explican los cambios que se observan en un indicador agregado (Wang, Ang y Su 2017). El indicador agregado de base que suele descomponerse es la intensidad en el consumo de recursos, frecuentemente la intensidad del consumo energético.

Se pueden revisar las recopilaciones de la literatura sobre el tema energético en Hoekstra y van den Bergh (2002), Su y Ang (2012) y Wang, Ang y Su (2017). Estos análisis se realizan principalmente con los resultados de las matrices insumo-producto físicas derivadas del método de precios implícitos porque desde el modelo de unidades híbridas no se pueden sumar por columnas las diferentes unidades que caracterizan a la tabla de insumos y productos físicos. No obstante, existen mecanismos para resolver esta dificultad, conforme lo analizan Dietzenbacher y Stage (2006). Estos mecanismos se encuentran en línea con mi propuesta para el análisis de sectores claves que presentaré en el capítulo final.

Preparación de la información

La información de base para el desarrollo de este método corresponde a un vector o a una matriz de precios, cuyo alcance depende de la disponibilidad de información. La mayor facilidad operativa resulta de asumir un esquema de precios unitarios promedio por sector, esto significa que el punto de partida de la versión básica del método de precios implícitos es un vector de precios que puede originarse en la combinación entre los datos de oferta total en unidades monetarias y en unidades físicas. En el caso del Ecuador, por ejemplo, con cifras de la tabla de utilización publicadas por el BCE para el año 2016, se conoce que la oferta total de petróleo alcanzó 8926 millones de dólares de 2007 (BCE 2016). Mientras que la oferta total de esta fuente primaria de energía fue de 62,2 millones de bep ese mismo año, según los datos del balance energético nacional de la OLADE (2016). Así, el valor unitario del petróleo se calcula en 143,5 dólares por cada bep.

De asumir este valor unitario como promedio para los sectores energéticos y no energéticos de la economía, se puede obtener una matriz de insumos y productos en unidades de energía, cuya estructura reproduce los intercambios que muestra la matriz insumo-producto

monetaria. La lectura de estos valores sería como se expone a continuación: la cantidad de petróleo (del sector **i**) que se vende como producto intermedio a los diversos sectores económicos del sistema (**j** sectores) determina el consumo intermedio de petróleo en unidades energéticas, esto es, 4,5 millones de bep. Este monto, más el consumo final de esta fuente (57,7 millones de bep), comprende la oferta total de petróleo de la economía ecuatoriana que, como he dicho, asciende a 62,2 millones de bep en 2016.

La construcción de la matriz energética de insumos y productos, que ya expliqué en el capítulo previo, muestra información diferente a la anteriormente descrita porque evidencia los intercambios de flujos de energía que tienen lugar en los procesos de transformación de las fuentes primarias de energía en energías secundarias. En ese contexto, lo que esta matriz física exhibe no son transacciones económicas, sino transacciones energéticas en el marco de los requerimientos del sistema económico.

Para entender mejor este punto, tomaré el caso del petróleo. Esta fuente primaria se intercambia energéticamente con los sectores secundarios que agrupan la producción de derivados de petróleo, tales como gasolina, diésel, entre otros. Sin embargo, no registra transacciones energéticas directas con los sectores económicos de consumo como la industria o el transporte. ¿Por qué? La razón es simple, el petróleo no se consume como fuente de energía primaria de manera directa en la economía, sino que esta consume los combustibles como fuentes secundarias que ponen en funcionamiento la maquinaria industrial o el transporte público, por ejemplo. En el sistema económico, en cambio, los intercambios no son estrictamente de carácter energético. De hecho, en la tabla monetaria se hallan registradas las ventas de petróleo a la industria y al transporte.

En estas condiciones la estructura de la matriz insumo-producto monetaria será distinta a la que caracteriza a los flujos físicos de energía porque ambas muestran procesos diferentes de intercambio. La primera exhibe transacciones esencialmente económicas, y la segunda, intercambios energéticos. En estos dos casos no habría inconsistencia con los principios termodinámicos, sino una lectura diferente de los intercambios que tienen lugar desde dos construcciones diferentes de la tabla física, en este caso de la matriz insumo-producto energética. En términos físicos será necesario verificar el cumplimiento de las condiciones de balance que caracterizan a los intercambios de materia o energía desde el principio de la conservación. Por esta razón, argumento que el balance de una matriz de insumos y productos originada en la descripción de intercambios económicos requiere condiciones de balance específicas para esos intercambios económicos, que podrán ser diferentes (o seguramente serán diferentes) a las condiciones de balance de la matriz de flujos energéticos por las razones expuestas.

En mi opinión, ambas construcciones pueden ser válidas para distintos objetivos de investigación. Cuando sea de interés evaluar los intercambios económicos en unidades energéticas, será de utilidad la matriz que se origina en los precios promedio de cada sector económico. Asimismo, al investigar la estructura energética asociada con los procesos de transformación para generar distintas fuentes secundarias de energía útiles para operar el sistema económico, la matriz de insumos y productos energéticos que se origina en el balance de energía será la indicada.

Mi argumento sobre la consistencia de ambos procedimientos se basa, además, en una característica particular en la derivación de la matriz física de intercambios a partir de la matriz monetaria. El hecho es que cuando el punto de partida es una matriz de precios en lugar de un vector de precios promedio sectoriales, al poner en evidencia la estructura de precios del sistema el resultado es una matriz física exactamente igual a la que se construye desde los intercambios físicos. La razón es que la matriz de precios tiende un puente analítico, que permite hacer una lectura de los intercambios energéticos desde la estructura de precios que caracterizan al sistema. Este aspecto será visible en la aplicación metodológica que presentaré en la penúltima sección de este capítulo.

En el caso que planteo es fácil definir esta matriz de precios que combina los intercambios intersectoriales monetarios y físicos, al disponer de la matriz de insumos y productos que detalla en unidades físicas las características de las transacciones energéticas. La construcción de esta matriz energética ya la he explicado en un capítulo previo. Debo anotar, sin embargo, que obtener esta información puede revestir serias dificultades de carácter práctico.

Uno de los mayores obstáculos es que la información puede hallarse disponible en versiones incompletas o poco fiables. Por esta razón, la versión básica del modelo, como he denominado al método que se basa en precios promedio sectoriales, es la opción más frecuente y ampliamente utilizada en la literatura, pues no requiere de una matriz física completa, sino solamente de un vector de oferta total de energía o un vector de precios promedio sectoriales. Al emplear este enfoque será necesario ser cuidadoso con el alcance del tema por investigar. Considero que el problema con su empleo es la interpretación de los intercambios que permite realizar. Se pueden estudiar los intercambios energéticos que acompañan a las transacciones económicas pero no se pueden analizar intercambios energéticos asociados con los procesos de transformación energética. En este contexto, el cumplimiento del principio de conservación específico para este tipo de intercambios no revestiría dificultades, sería distinto del que se aplica a una matriz originada en datos físicos.

Respecto de la matriz de intercambios económicos, he considerado la tabla de utilización que publica anualmente el BCE (2016). No explicaré el procesamiento para derivar 12 sectores energéticos y cinco sectores económicos en una matriz de balance idéntico entre los totales de filas y columnas de las transacciones monetarias intersectoriales de insumos y productos, pues esta descripción se puede revisar en el capítulo previo. Sí explico una ligera modificación que aplico a esta tabla, puesto que sirve de base para calcular precios que se computan por el cociente entre los flujos monetarios y los flujos físicos. Aquellos datos monetarios con valores nulos resultarán en precios nulos y devolverán al reporte de información física también valores nulos en lugar de estimaciones consistentes de los flujos energéticos.

A fin de salvaguardar estos cálculos, sustituyo los valores en dólares de 0 por $1x10^{-7}$ tanto en el consumo intermedio como en la demanda final. De esta forma, aunque el gas licuado no se reporta (no se registra en la tabla de utilización) en las ventas hacia el sector agropecuario, de pesca y minería sí se lo emplea como insumo energético para estas actividades (de acuerdo con la matriz insumo-producto energética). El valor unitario

correspondiente, sin alterar la tabla, sería cero ($\mathbf{p_{ij} = \frac{z_{ij}}{z_{ij}^{P}} = \frac{0}{138} = 0}$) y con ello, la transacción energética también sería cero, en lugar de 138 Kbep que reporta la tabla de energía, puesto que el valor físico se deriva por el producto del inverso del precio implícito y el consumo intermedio de la transacción correspondiente ($\mathbf{z_{ij}^{P} = \frac{z_{ij}}{p_{ij}}}$), con un valor unitario de cero se origina una indeterminación en esta operación ($\mathbf{z_{ij}^{P} = \frac{1}{0} \times z_{ij}}$ = indeterminado) que impide tomar en cuenta este flujo. Como solución a este inconveniente propongo asignar un valor en dólares muy pequeño al consumo intermedio o a la demanda final, según se requiera, de manera que el precio implícito, en este caso del gas licuado en el sector agropecuario, se hallará muy por debajo del centavo de dólar por cada bep, en lugar de ser cero ($\mathbf{p_{ij} = \frac{z_{ij}}{z_{ij}^{P}} = \frac{1x10^{-7}}{138}} = 7{,}27 \times 10^{-10}$).

Este cambio en la matriz insumo-producto monetaria basta para derivar la transacción energética correspondiente a 138 Kbep entre estos sectores como indica la matriz insumo-producto energética ($z_{ij}^{P} = \frac{1}{7{,}27 \times 10^{-10}} \times (1 \times 10^{-7}) = 138$).

Método

En esta sección describo el método general de precios implícitos y sus variantes basándome en los textos de Miller y Blair (2009), Merciai y Heijungs (2014) y, en menor medida, en la propuesta de Weisz y Duchin (2006).

Método de intensidades energéticas a partir de precios no homogéneos: una lectura de los intercambios energéticos

La matriz de precios $\mathbf{P} = [\ p_{kj}\ ]$ exhibe los precios implícitos de la energía, es decir, el valor en dólares que se paga por cada unidad de energía del tipo **k** (**k = 1, ..., m**) que se suministra al sector de consumo **j** (**j = 1, ..., n**). En esta versión del método de precios implícitos, construyo una matriz de precios que se aplica a los intercambios interindustriales y energéticos, y vectores de precios para la demanda final $\mathbf{p^f}$ y la oferta total $\mathbf{p^x}$. Por ahora empiezo con los intercambios interindustriales y energéticos, en donde defino la matriz **P**, de dimensión **m x n**, de la siguiente forma:

$$\mathbf{p_{m \times n} = [p_{kj}] = \begin{cases} \frac{z_{kj}}{z_{kj}^{p}} \text{ para } z_{kj}^{p} \neq 0 \\ 0 \text{ para } z_{kj}^{p} = 0 \end{cases}}$$

P tiende un puente analítico entre las transacciones económicas y los intercambios físicos, por lo que a partir del valor unitario de los intercambios ($\mathbf{p_{kj} = z_{kj}/z_{kj}^{p}}$) se puede

recuperar la matriz de intercambios energéticos $\mathbf{Z}^{P}$, de dimensión **m** × **n**, de la siguiente forma:

$$\mathbf{Z}^{P}_{m\times n} = [z^{P}_{kj}] = \begin{cases} \frac{z_{kj}}{p_{kj}} \text{ si } p_{kj} \neq 0 \\ 0 \text{ si } p_{kj} = 0 \end{cases}$$

$\mathbf{Z}^{P}$ reflejará los intercambios de energía en unidades físicas, desde los productores hacia los consumidores para **m** sectores energéticos y **n** sectores económicos, aunque en este caso dicho intercambio se ve condicionado por la disponibilidad energética para cada transacción. Para explicar mejor este aspecto, tomo el caso de la producción de alcohol a partir de caña de azúcar. En la matriz económica corresponde al elemento $\mathbf{z}_{51}$ = 1079 que se mide en miles de dólares; mientras que en la matriz energética $\mathbf{z}^{P}_{51}$= **0**.

Conforme la definición de la matriz de precios que acabo de plantear, el precio correspondiente a esta transacción sería $\mathbf{p}_{51} = \mathbf{z}_{51}/\mathbf{z}^{P}_{51} = \mathbf{0}$ porque $\mathbf{z}^{P}_{51} = \mathbf{0}$. De esta manera, la matriz de intercambios energéticos mostrará para este elemento una oferta nula, es decir, $\mathbf{z}^{P}_{51} = \mathbf{0}$ porque $\mathbf{p}_{51} = \mathbf{0}$. Esto significa que la estructura de precios que he definido refleja las transacciones económicas condicionadas por la disponibilidad energética de esta transacción. En este ejemplo, aunque existe una transacción económica, no hay un intercambio de carácter físico, de ahí los precios implícitos nulos que se hallan asociados.

La matriz de flujos energéticos $\mathbf{Z}^{P}$, de dimensión **m x n**, se debería poder recuperar a partir de la intensidad energética o el inverso de los precios interindustriales así definidos. Sin embargo, una dificultad podría identificarse con los valores nulos de la matriz monetaria **Z** (y/o con el vector de consumo final **f**). Por esta razón, estos valores son reemplazados por un valor muy bajo (1×10^{-7}), que no altera la composición de esta matriz, tal como explico en la sección de preparación de la información. Este reemplazo permite, además, recuperar la matriz de intercambios interindustriales en unidades físicas $\mathbf{Z}^{P}$ y la matriz de intensidad energética **D** o $\mathbf{D}^{A}$, que definiré más adelante.

El siguiente paso es definir los precios implícitos del consumo final $\mathbf{p}^{f}$ y de la oferta total $\mathbf{p}^{x}$, que permitirán recuperar los vectores correspondientes de consumo final $\mathbf{f}^{P}$ y oferta total $\mathbf{x}^{P}$ en unidades físicas, todos estos vectores, cuya dimensión es **m x 1**, los defino a continuación:

$$\mathbf{p}^{f} = [\,p^{f}_{k}] = \begin{cases} \frac{f_{k}}{f^{p}_{k}} \text{ si } f^{p}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } f^{p}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$\mathbf{p}^{x} = [\,p^{x}_{k}] = \begin{cases} \frac{x_{k}}{x^{p}_{k}} \text{ si } x^{p}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } x^{p}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$\mathbf{f}^{P} = [\,f^{P}_{k}] = \begin{cases} \frac{f_{k}}{p^{f}_{k}} \text{ si } p^{f}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } p^{f}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{P} = [\,x^{P}_{k}] = \begin{cases} \frac{x_{k}}{p^{x}_{k}} \text{ si } p^{x}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } p^{x}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

En donde p_k^f se interpreta como el precio implícito por cada unidad de energía que requiere el suministro de la demanda final. El recíproco de este vector de precios corresponde conceptualmente a la intensidad energética del consumo final. De forma similar, p_k^x corresponde al precio implícito de cada unidad de energía que se requiere para abastecer la oferta total. Su recíproco refiere a la intensidad energética de la oferta total.

La matriz $\mathbf{Z}^P$, junto con los vectores $\mathbf{f}^P$ y $\mathbf{x}^P$, sirven de base para definir la identidad contable básica del modelo de intensidad energética que ya describí para el modelo con precios implícitos promedio como

$$\mathbf{Z}^P\mathbf{1}_n + \mathbf{f}^P = \mathbf{x}^P$$

En analogía a la matriz $\mathbf{A} = \mathbf{Z}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$ del modelo tradicional de Leontief, también en este caso se define la matriz de coeficientes técnicos en unidades energéticas, que reflejará la intensidad energética del modelo como describo a continuación:

$$\mathbf{D} = \mathbf{Z}^P(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

Hay que recordar que **x** posee una dimensión **n x 1**. Esta vez también empleo un segundo enfoque para construir la matriz **D**, que designo como $\mathbf{D}^A$ siguiendo la definición ya planteada para el caso del modelo con precios promedio sectoriales, pero esta vez con una matriz de precios:

$$\mathbf{D}^A = [d_{kj}^A] = \begin{cases} \frac{a_{kj}}{p_{kj}} \text{ para } p_{kj} \neq 0 \\ 0 \text{ para } p_{kj} = 0 \end{cases}$$

Como ya he explicado, la utilidad principal de una definición de la intensidad energética del modelo a partir de la matriz $\mathbf{D}^A$ es que se construye a partir de la matriz **A**, que se puede derivar de las cuentas económicas. Asimismo, será más fácil construir información sobre precios que sobre información en unidades físicas. Argumento que la información de base para obtener la matriz **D**, esto es, $\mathbf{Z}^P$ no siempre está disponible o se halla fragmentada. Por esta razón, se han desarrollado los métodos que reviso en este libro para realizar aproximaciones; y aunque la información que permite construir $\mathbf{D}^A$, es decir **P**, no se halla libre de dificultades, esta puede identificarse de mejor manera en las cuentas económicas nacionales.

También, a partir de una matriz de precios se puede demostrar que las definiciones de las matrices **D** y $\mathbf{D}^A$ son equivalentes, en un procedimiento similar al que apliqué en la sección previa.

Retomo una vez más la matriz de coeficientes técnicos de Leontief $A = Z(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$, cuyos componentes se pueden expresar así:

$$a_{kj} = \frac{z_{kj}}{x_j}$$

Puesto que:

$$p_{kj} = \frac{z_{kj}}{z_{kj}^{P}}$$

$$z_{kj} = (p_{kj})(z_{kj}^{P})$$

Reemplazo z_{kj} en $a_{kj} = \frac{z_{kj}}{x_j}$:

$$a_{kj} = \frac{z_{kj}}{x_j} = \frac{(p_{kj})(z_{kj}^{P})}{x_j}$$

$$\frac{a_{kj}}{p_{kj}} = \frac{z_{kj}^{P}}{x_j}$$

Como $d_{kj} = \frac{z_{kj}^{P}}{x_j}$ para $x_j \neq 0$ y $d_{kj}^{A} = \frac{a_{kj}}{p_{kj}}$ para $p_{kj} \neq 0$

Surge una equivalente para los casos $x_j \neq 0$ y $p_{kj} \neq 0$:

$$d_{kj}^{A} = \frac{a_{kj}}{p_{kj}} = \frac{z_{kj}^{P}}{x_j} = d_{kj}$$

Por tanto, se asume una similitud matricial para casos no nulos: $D^{A} \approx D$

Por lo tanto, en general, se asume que d_{kj} podrá expresarse de manera equivalente así:

$$d_{kj} = \frac{a_{kj}}{p_{kj}} \text{ o } d_{kj} = \frac{z_{kj}^{P}}{x_j}$$

La derivación de lo que sigue a continuación consta en la sección previa.
La identidad contable básica de este modelo es:

$$Z^{P} 1_n + f^{P} = x^{P}$$

Se puede reemplazar por:

$$Dx + f^{P} = x^{P}$$

Esta expresión es análoga a aquella del modelo tradicional de Leontief, $Ax + f = x$ (que además se asumirá equivalente a $D^{A}x + f^{P} = x^{P}$). Por ello, D (o D^{A}) se interpreta como la cantidad de energía de un determinado tipo k ($k = 1, ..., m$) que se requiere directamente para la producción de un dólar en cada uno de los sectores económicos j ($j = 1, ... n$). La combinación de estas dos últimas expresiones permite establecer los coeficientes energéticos totales interindustriales de esta forma:

$$Dx = D\,[\,I_n - A\,]^{-1} f$$

Esta expresión será también equivalente a $D^{A}x = D^{A}\,[\,I_n - A\,]^{-1} f$.

En este punto se busca definir una matriz análoga a la inversa de Leontief,[1] que notaré como ε, de dimensión **m x n**, que contenga los requerimientos energéticos totales para cubrir la oferta total de energía:

$$\mathbf{x}^{P} = \varepsilon \mathbf{f}$$

Tal como hice en la sección previa, tomo como punto de partida la definición de la oferta total de energía $\mathbf{x}^{P} = \mathbf{Dx} + \mathbf{f}^{P}$ y noto que $\mathbf{x}^{P} = \mathbf{D}[\ \mathbf{I}_n - \mathbf{A}\ ]^{-1}\mathbf{f} + \mathbf{f}^{P}$.

Aíslo los coeficientes de intensidad energética asociados al consumo final de cada fuente a partir de la matriz $\tilde{\mathbf{Q}}^{f}$, que estará compuesta como máximo por **m** elementos distintos de cero porque se analizan **m** sectores energéticos que son consumidores finales de recursos, y se construirá en dimensión **m** x **n**:

$$\tilde{\mathbf{Q}}^{f}_{m\times n} = [\tilde{q}^{\ f}_{kj}] = \begin{cases} \dfrac{1}{P_k^{f}} & \textbf{si } k=j \\ 0 & \textbf{si } k\neq j \end{cases}$$

Se conoce que, por definición, el producto de la intensidad energética en el consumo final por la demanda final en unidades monetarias es equivalente a la demanda final en unidades físicas:

$$\mathbf{f}^{P} = \tilde{\mathbf{Q}}^{f}\,\mathbf{f}$$

Al reemplazar esta definición en la expresión anterior, se puede expresar la oferta total de energía en términos de la demanda final en unidades monetarias **f** de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}^{P} = \mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{f} + \tilde{\mathbf{Q}}^{f}\mathbf{f}$$

Entonces, la oferta total en unidades físicas se puede expresar así:

$$\mathbf{x}^{P} = \{\mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}^{f}\}\mathbf{f}$$

Así, la matriz de coeficientes energéticos totales ε, de dimensión **m x n**, se describe de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}^{f}$$

Entonces, la oferta energética total será:

$$\mathbf{x}^{P} = \varepsilon \mathbf{f}$$

[1] Hay que recordar que en el modelo de Leontief una forma de definir la oferta total puede ser así: $\mathbf{x} = \mathbf{Lf}$ o $\mathbf{x} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}$.

La matriz ε muestra analogías con la matriz α^H del modelo de unidades híbridas, definida como $\mathbf{x}^P = \alpha^H \mathbf{f}^*$. Como expliqué en la sección previa, α^H recoge a coeficientes energéticos que carecen de unidad de medida. En estas condiciones puede compararse con ε al expresarse en términos relativos a la oferta económica total: $\varepsilon^H = (\alpha^H \hat{\mathbf{x}}^*)(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$. De esta manera, tanto ε como ε^H expresan la cantidad total de energía, medida en unidades energéticas por cada dólar de la oferta nacional que se requiere para cada tipo de energía, tanto de manera directa como indirecta, y como función de la demanda final **f**, aunque en el modelo de unidades híbridas se cuentan las distintas unidades de medida de la demanda final. Los resultados obtenidos por estas dos vías reflejan las características de cada método. El de unidades híbridas muestra flujos interindustriales condicionados por los intercambios energéticos. El método de precios implícitos, en cambio, se basa en intensidades energéticas.

Método de intensidades energéticas a partir de precios homogéneos: una lectura de la dimensión física del intercambio económico en la matriz insumo-producto

Defino el vector de precios $\bar{\mathbf{p}}$ a partir de la oferta total en unidades monetarias y energéticas, que corresponderá a un precio promedio de cada sector energético. Formalmente, este vector de dimensión **m** × **1** se describe de la siguiente manera:

$$\bar{\mathbf{p}}_{m\times 1} = [\bar{\mathbf{p}}_k] = \begin{cases} \frac{\mathbf{x}_k}{\mathbf{x}_k^P} \text{ para } \mathbf{x}_k^P \neq 0 \\ 0 \text{ para } \mathbf{x}_k^P = 0 \end{cases}$$

El vector $\bar{\mathbf{p}}$ exhibe los precios ecológicos implícitos, en este caso los precios implícitos de la energía como promedios sectoriales. Esto se interpreta como el valor promedio en dólares que se paga por cada unidad de energía del tipo **k** (**k=1, ..., m**) a todos los sectores de consumo **j** (**j=1, ..., n**). El precio implícito para cada fuente de energía se obtiene a partir del cociente entre la oferta energética monetaria ($\mathbf{x}_k$) y la oferta energética medida en unidades físicas ($\mathbf{x}_k^P$).

La matriz de flujos energéticos $\mathbf{Z}^P$, de dimensión **m** × **n**, se asume desconocida en esta versión básica del modelo de precios implícitos y reflejará los intercambios de energía en unidades físicas desde los productores hacia los consumidores para **m** sectores energéticos y **n** sectores económicos. En esta matriz se identifica, por lo tanto, los insumos energéticos del sistema. Se puede definir a partir de la combinación de los precios implícitos de la oferta y los consumos económicos intersectoriales así:

$$\mathbf{Z}^P_{m\times n} = [\mathbf{z}^P_{kj}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{z}_{kj}}{\bar{\mathbf{p}}_k} \text{ si } \bar{\mathbf{p}}_k \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } \bar{\mathbf{p}}_k = \mathbf{0} \end{cases}$$

La matriz $\mathbf{Z}^{P}$ servirá de base para definir la identidad contable básica del modelo de intensidad energética, nombre con el cual también se identifica al método de precios implícitos. La estructura de $\mathbf{Z}^{P}$ sigue la formulación del modelo tradicional de Leontief. Por ello, la identidad contable básica en unidades físicas coincide con aquella que corresponde al método de unidades híbridas, es decir:

$$\mathbf{Z}^{P}\mathbf{1}_{n} + \mathbf{f}^{P} = \mathbf{x}^{P}$$

Al vector de suministro energético para el consumo final lo noto como $\mathbf{f}^{P}$, cuya dimensión es **m x 1**. Este vector se define también sobre la base de los precios implícitos promedio sectoriales $\bar{\mathbf{p}}_{k}$:

$$\mathbf{f}^{P}_{m\times 1} = [\mathbf{f}^{P}_{k}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{f}_{k}}{\bar{\mathbf{p}}_{k}} \text{ si } \bar{\mathbf{p}}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } \bar{\mathbf{p}}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

Es preciso notar que, en algunos casos, los elementos del vector $\mathbf{f}^{P}$ pueden tomar valores negativos. Esto sucede porque en el vector monetario **f**, del que se originan, se registraron valores de consumo final negativo. Si se quiere, una forma de interpretar valores negativos del consumo final es como *desahorros*, porque el consumo intermedio no ha podido cubrirse con la oferta total que se halla disponible.

Por la relación que guarda este método con la estructura del modelo tradicional de Leontief, se define aquí una matriz de coeficientes energéticos directos similar a la matriz de coeficientes técnicos $\mathbf{A} = \mathbf{Z}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$. En esta ocasión, los coeficientes técnicos correspondientes se miden en términos físicos y los noto a partir de la matriz **D** de dimensión **m x n**, es decir:

$$\mathbf{D} = \mathbf{Z}^{P}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

Los elementos de la matriz **D** indican la cantidad de energía, medida en unidades energéticas, de un determinado tipo **k** (**k = 1, ..., m**) que se requiere directamente para producir un dólar en cada uno de los sectores económicos **j** (**j = 1, ..., n**). Precisamente, este factor determina la intensidad ecológica, en este caso la intensidad energética asociada a una transacción. En la práctica, la intensidad energética se expresa como el inverso de los precios implícitos.

Otro camino para construir un concepto similar a la intensidad energética definida en la matriz **D** es sobre la base de la matriz de precios implícitos de la energía **P** y la matriz de coeficientes técnicos **A**. Designaré a esta definición alternativa como $\mathbf{D}^{A}$:

$$\mathbf{D}^{A} = [\mathbf{d}^{A}_{kj}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{a}_{kj}}{\bar{\mathbf{p}}_{kj}} \text{ para } \bar{\mathbf{p}}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ para } \bar{\mathbf{p}}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

La matriz $\mathbf{D}^{A}$ es una propuesta consistente por dos razones. En primer lugar, su construcción se basa en información que puede revestir menos dificultades en su disponibilidad.

Por un lado, la matriz **A** que se puede derivar de las cuentas económicas, y, por otro, los precios promedio sectoriales de la energía a veces se detallan en encuestas especializadas y pueden servir para complementar la información requerida. Como he explicado, los precios que se usan en este método son de carácter implícito y, por ello, no determinan precisamente la circulación de bienes en el mercado.

En segundo lugar, $\mathbf{D^A}$ se define por sus elementos antes que matricialmente porque la operación matricial para obtener los valores $\frac{a_{kj}}{\bar{p}_k}$ no se puede realizar con dimensiones incompatibles en el numerador y el denominador. En efecto, **A** es una matriz cuadrada **n x n**; mientras que aun cuando se obtenga la matriz diagonal y luego la inversa del vector $\bar{\mathbf{p}}$, de dimensión **m x 1**, no se podría aplicar un hipotético producto de matrices $(A_{nxn})(\widehat{\bar{p}}_{mxm})$. No obstante, puede demostrarse, como haré a continuación, la similitud entre **D** y $\mathbf{D^A}$ (para casos con valores no nulos en las variables de relevancia). Esta similitud se observa al incorporar al análisis la matriz de coeficientes técnicos de Leontief $\mathbf{A = Z(\hat{x})^{-1}}$, cuyos componentes se pueden expresar así:

$$a_{kj} = \frac{z_{kj}}{x_j}$$

Así, parto de los precios implícitos promedio:

$$\bar{p}_k = \frac{x_k}{x_k^P}$$

Uso este precio promedio también para las transacciones interindustriales, entonces:

$$z_{kj}^P = \frac{z_{kj}}{\bar{p}_k}$$

Despejo z_{kj}:

$$z_{kj} = (\bar{p}_k)(z_{kj}^P)$$

Reemplazo z_{kj} en $a_{kj} = \frac{z_{kj}}{x_j}$:

$$a_{kj} = \frac{(\bar{p}_k)(z_{kj}^P)}{x_j}$$

$$\frac{a_{kj}}{\bar{p}_k} = \frac{z_{kj}^P}{x_j}$$

Como $d_{kj} = \frac{z_{kj}^P}{x_j}$ para $x_j \neq 0$

y $d_{kj}^A = \frac{a_{kj}}{\bar{p}_k}$ para $\bar{p}_k \neq 0$

La equivalencia en cada componente $\mathbf{d_{kj}}$ será (para casos no nulos):

$$d_{kj}^A = \frac{a_{kj}}{\bar{p}_k} = \frac{z_{kj}^P}{x_j} = d_{kj}$$

La similitud matricial será $\mathbf{D^A \approx D}$

Por lo tanto, $\mathbf{d_{kj}}$ podrá expresarse de manera equivalente así:

$$d_{kj} = \frac{a_{kj}}{\bar{p}_k} \text{ o } d_{kj} = \frac{z_{kj}^P}{x_j}$$

Con estos elementos puedo reemplazar la identidad contable básica de este modelo ($\mathbf{Z^P 1_n + f^P = x^P}$) de la siguiente manera:

Sea	$\mathbf{D = Z^P(\hat{x})^{-1}}$
Despejo $\mathbf{Z^P}$:	$\mathbf{D\hat{x} = Z^P}$
Reemplazo $\mathbf{Z^P}$ en la identidad contable básica $\mathbf{Z^P 1_n + f^P = x^P}$:	$\mathbf{D\hat{x}1_n + f^P = x^P}$
Reemplazo $\mathbf{\hat{x}1_n = x}$	$\mathbf{Dx + f^P = x^P}$

La expresión $\mathbf{Dx + f^P = x^P}$ es análoga a aquella del modelo tradicional de Leontief, $\mathbf{Ax + f = x}$. Estas dos identidades se combinan entre sí para establecer los coeficientes energéticos totales interindustriales **Dx**. El procedimiento es el siguiente:

Como	$\mathbf{Ax + f = x}$
Despejo **x**:	$\mathbf{f = x - Ax}$
	$\mathbf{f = [\, I_n - A\,]\, x}$
	$\mathbf{x = [\, I_n - A\,]^{-1}\, f}$
Determino **Dx**:	$\mathbf{Dx = D\,[\, I_n - A\,]^{-1}\, f}$

Cabe notar que según la similitud asumida como $\mathbf{D^A \approx D}$, también debería identificarse una equivalencia entre $\mathbf{D^A x \approx Dx}$, por lo tanto, entre $\mathbf{D^A x + f^P = x^P}$ y $\mathbf{Dx + f^P = x^P}$. Ahora, tal como lo hice en el modelo de unidades híbridas,[2] busco definir una matriz equivalente a la inversa de Leontief,[3] que notaré como ε, de dimensión **m** × **n**, la cual contenga los requerimientos energéticos totales para cubrir la oferta total de energía:

$$\mathbf{x^P = \varepsilon f}$$

En este caso tomo como punto de partida la definición de la oferta total de energía, $\mathbf{x^P = Dx + f^P}$. Se conoce que los coeficientes interindustriales **Dx** se pueden expresar en términos del modelo tradicional de Leontief como $\mathbf{Dx = D[\, I_n - A\,]^{-1} f}$. Al combinar estas expresiones, tengo que $\mathbf{x^P = D[\, I_n - A\,]^{-1}\, f + f^P}$.

Una forma de aislar los coeficientes de intensidad energética asociados a cada fuente es a partir de la matriz $\tilde{\mathbf{Q}}$, que estará compuesta como máximo por **m** elementos distintos de cero, porque se analiza **m** sectores energéticos, y se construirá en dimensión **m** × **n**:

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{m\times n} = [\tilde{q}_{kj}] = \begin{cases} \dfrac{1}{\bar{P}_k} \text{ si } k=j \\ 0 \text{ si } k\neq j \end{cases}$$

[2] En este modelo se planteó como $\mathbf{x^P = \alpha^H f^*}$.
[3] Esto es, $\mathbf{L = (I_n - A)^{-1}}$.

Se conoce que, por definición, el producto de la intensidad energética por la demanda final en unidades monetarias es equivalente a la demanda final en unidades físicas:

$$\mathbf{f}^{P} = \tilde{\mathbf{Q}}\,\mathbf{f}$$

Al reemplazar esta definición en la expresión anterior, se puede expresar la oferta total de energía en términos de la demanda final en unidades monetarias **f** de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}^{P} = \mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{f} + \tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{f}$$

Despejo para aislar **f**:

$$\mathbf{x}^{P} = \{\mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}\}\mathbf{f}$$

Así, la matriz de coeficientes energéticos totales ε, de dimensión **m** × **n**, la describo de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}$$

Entonces, la oferta energética total será $\mathbf{x}^{P} = \varepsilon\mathbf{f}$

La matriz ε muestra analogías con la matriz α^{H} del modelo de unidades híbridas, definida como $\mathbf{x}^{P} = \alpha^{H}\mathbf{f}^{*}$. Tanto α^{H} como ε expresan la cantidad total de energía, medida en unidades energéticas, que se requiere para cada tipo de fuente, tanto de manera directa como indirecta, y como función de la demanda final **f**. La diferencia es que en este caso la base de la estimación son intensidades energéticas que se definen en función del intercambio económico de los flujos energéticos.

Método para estimar las emisiones de dióxido de carbono (CO_2)

En esta sección explico la estimación de emisiones de CO_2 asociada a los flujos energéticos **E**, que se describen en la matriz insumo-producto que he estimado por el método de intensidad energética (y precios implícitos) en este capítulo. Para esta construcción, combino los coeficientes y métodos estándares de la última guía metodológica del IPCC (2006) con el último manual de métodos disponible de la OLADE (2017), y estimo la cantidad de emisiones de CO_2 sobre la base del volumen de carbono (C) contenido en los combustibles fósiles que se utilizan en una economía. Por ello, "las emisiones de CO_2 dependen básicamente de las características de los combustibles y no de las tecnologías de su aprovechamiento" (OLADE 2017, 103).

El primer paso en la estimación es identificar el consumo aparente de energía **CA**, concepto que sirve para identificar aquella parte del consumo que se realiza efectivamente dentro del país, es decir, neto del almacenamiento y la exportación que corresponde a las

distintas fuentes primarias y secundarias. Con los rubros disponibles en el balance energético de la OLADE, el consumo aparente se calcula de la siguiente forma:

$$\mathbf{CA = PP + M - X - NA + VI}$$

En donde	**PP**	Producción primaria
	M	Importaciones
	X	Exportaciones
	NA	No aprovechado
	VI	Variación de inventarios

He optado por el consumo intermedio de energía como una alternativa al consumo aparente para las fuentes secundarias de energía, porque cuento con una matriz de flujos energéticos que se desarrolla sobre la base de las cifras de consumo propio, pérdidas de la transformación, consumo energético sectorial e insumos de la transformación. El consumo intermedio de energía es propicio para los fines de estimación de las emisiones de CO_2 asociadas a estos intercambios energéticos, porque excluye de las cuentas las cifras de producción de energía secundaria que duplicarían las emisiones de CO_2 asociadas con la generación desde estas fuentes, y los datos de exportación que no permitirían analizar el uso doméstico de las fuentes energéticas. En efecto, el carbono contenido en las energías secundarias ya se halla contabilizado en la energía primaria a partir de la cual se obtienen estas energías secundarias. Precisamente, los insumos energéticos tanto domésticos como importados, que se emplean en el proceso de transformación, los incluyo en la matriz híbrida de insumos y productos energéticos, $\mathbf{Z}^{P}$.

Desde este enfoque también es posible evaluar las emisiones asociadas a la oferta total de fuentes energéticas primarias y secundarias porque al sumar el consumo final ajustado[4] al consumo intermedio de energía, se obtiene la oferta total. En estas condiciones, para el caso de las fuentes secundarias, será siempre necesario mantener presente que las emisiones asociadas a la oferta pueden analizarse de manera correcta a través del consumo intermedio.

El cálculo de emisiones de CO_2 asociadas al consumo intermedio de energía tiene una ventaja adicional. Se evita un ajuste por la producción de fuentes secundarias de energía que, en ciertos casos, deriva en valores negativos del consumo aparente aceptables de acuerdo con el manual de la OLADE (2017), al interpretarse como indicativos de exportación neta porque la producción nacional no se contabiliza. Pienso, sin embargo, que esta puede ser una interpretación imprecisa porque efectivamente dicha exportación de productos energéticos no tiene lugar y, por lo tanto, tampoco son emisiones de CO_2 que se contabilizarán en los inventarios de otros países.

El segundo paso en la estimación de emisiones de CO_2 es la identificación de factores de conversión apropiados. Es necesario registrar el contenido de carbono de cada una de

[4] Denomino consumo final ajustado a la suma del valor del consumo de energía más los ajustes estadísticos que se incluyen en los balances energéticos de la OLADE. Estos ajustes estadísticos cuentan errores de medición, datos incompletos o aproximaciones por conversión de unidades, que mantienen brechas entre los cálculos de la oferta total y el consumo aparente que reporta la OLADE.

las fuentes energéticas que analizo, para lo cual empleo valores por defecto de las directrices del IPCC (2006) para inventarios nacionales de GEI. Por ejemplo, para el caso del petróleo crudo, el contenido de carbono se estima en 20 kg C/GJ o de manera equivalente, 20 t C/TJ. Adicionalmente, también el factor de oxidación que caracteriza a cada fuente de energía constituye un elemento importante para definir las emisiones.

En efecto, "no todo el carbono contenido en los combustibles se oxida durante el proceso de combustión", se asume que una pequeña fracción del total permanece almacenada indefinidamente (OLADE 2017, 105). En este caso uso los factores de oxidación sugeridos por la OLADE (2017) para los combustibles fósiles. Se interpreta, por ejemplo, que el 99,5 % del gas natural se oxida, y solo una pequeña fracción equivalente al 0,05 % queda almacenada indefinidamente sin generar emisiones de CO_2. Empleo los coeficientes de oxidación que corresponden a la caña de azúcar y leña de IPCC (2006). Finalmente, las cifras de emisiones se deberían ajustar por el volumen de carbono almacenado (o secuestrado) tanto en los productos no energéticos como también en los usos no energéticos de los combustibles y sus derivados. En nuestro caso de análisis no se incluye este factor porque no se registra consumo energético alguno en el balance de la OLADE.

Con estos elementos, la formulación para la estimación de las emisiones de CO_2 se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{CO_2 = CC \times COx \times \frac{MM_{CO_2}}{MM_C} \times \frac{1}{1000}}$$

Donde

CC	Contenido de carbono, medido en $\frac{\mathbf{tC}}{\mathbf{TJ}}$
COx	Carbono oxidado, medido en porcentaje
$\mathbf{MM_{CO_2}}$	Masa molecular del $\mathbf{CO_2}$, 44,0095 gramos.[5]
$\mathbf{MM_C}$	Masa molecular del **C**, 12,0107 gramos.
$\mathbf{CO_2}$	Emisiones de $\mathbf{CO_2}$, medidas en $\frac{\mathbf{Gg\ CO_2}}{\mathbf{TJ}}$

Resultados

Modelo de intensidad energética a partir de precios no homogéneos

Presento los resultados de la aplicación del modelo de precios implícitos (MPI), en este caso no homogéneos, para el Ecuador con información de 2016. Tal como en el caso del modelo de unidades híbridas, expongo resultados agregados para **m = 4** sectores energéticos a los que se suman dos sectores económicos **s = 2**, por lo que **n = 6** sectores. En esta

[5] Compuesto por una molécula de carbono (12,0107 gramos) y dos de oxígeno (15,9994 gramos por molécula).

versión del modelo se identifican diferencias respecto de la aplicación para 17 sectores, diferencias que se explican por la agregación de la información. Considero que siempre será recomendable analizar las características del sistema a partir de una estructura lo más desagregada posible, conforme lo haré en el siguiente capítulo. Por ahora busco presentar el procedimiento de derivación de la matriz insumo-producto física en aplicación del método de precios implícitos desde un enfoque expresamente didáctico, factible desde una matriz más pequeña.

Defino en primer lugar, la matriz de precios implícitos que corresponde a este ejercicio conforme detallo a continuación (tabla 3.1):

$$\mathbf{p}_{m\times n} = [\mathbf{p}_{kj}] = \begin{cases} \frac{z_{kj}}{z^{p}_{kj}} \text{ para } z^{p}_{kj} \neq 0 \\ 0 \text{ para } z^{p}_{kj} = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{p}^{f} = [\,\mathbf{p}^{f}_{k}] = \begin{cases} \frac{f_k}{f^{p}_k} \text{ si } f^{p}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } f^{p}_k = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{p}^{x} = [\,\mathbf{p}^{x}_{k}] = \begin{cases} \frac{x_k}{x^{p}_k} \text{ si } x^{p}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } x^{p}_k = 0 \end{cases}$$

Combino esta estructura de precios implícitos que no son homogéneos (PINH) con la matriz insumo-producto en unidades monetarias y con ello calculo la matriz insumo-producto física, cuya versión inicial presento en la tabla 3.2, la cual se completa de acuerdo con el siguiente detalle. Se distingue que el vector columna $\mathbf{x}^{P}$ tiene dimensión $\mathbf{m \times 1}$ (solo recoge a sectores energéticos), mientras que el vector fila $\mathbf{x}^{PE}$ tiene dimensión $\mathbf{1 \times n}$ (recoge tanto a sectores energéticos como a sectores económicos).[6] En este caso el vector $\mathbf{x}^{PE}$ se completa con la información que se deriva del proceso de balanceo:

$$\mathbf{f}^{P} = [\mathbf{f}^{P}_{k}]_{m\times 1} = \begin{cases} \frac{f_k}{p^{f}_k} \text{ si } p^{f}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } p^{f}_k = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{P} = [\mathbf{x}^{p}_{k}]_{m\times 1} = \begin{cases} \frac{x_k}{p^{x}_k} \text{ si } p^{x}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } p^{x}_k = 0 \end{cases}$$

La matriz de cuentas satélite, que permite completar el balance de energía, se construye al incorporar los siguientes insumos netos del sistema: las importaciones netas, los cambios netos en los inventarios y los flujos no aprovechados. Como ya he explicado, estos datos se ubican en el balance de energía que publica la OLADE. Además, debo calcular los residuos y las emisiones, que funcionan como ítems de balance para el análisis. En la tabla 3.3 presento estos componentes y agrego una columna que indica los detalles del cálculo correspondiente.

[6] Cabe notar que $\mathbf{M}(\mathbf{x}^{PE})' = \mathbf{x}^{P}$, donde la matriz $\mathbf{M}$ sigue la definición planteada en el capítulo 1.

Tabla 3.1. Matriz de precios implícitos ($ de 2007/bep)

P	1	2	3	4	5	6	p^f	p^x
1	0	0	51	0	324	0	199	150
2	0	17	6	11	13	0	5 050	131
3	0	0	34	0	44	132	326	140
4	0	0	22	572	63	36	165	71

Nota: los encabezados de la matriz y vectores son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.2. Matriz de flujos energéticos con PINH (10^6 bep)

Z^P	1	2	3	4	5	6	$Z^P 1_n$	f^P	x^P	$Z^P 1_n + f^P - x^P$
1	0,00	0,00	14,29	0,13	1,93	0,00	**16,35**	1,49	**17,84**	0,00
2	0,00	0,76	6,83	59,31	0,32	0,00	**67,22**	1,64	**68,86**	0,00
3	0,00	0,00	2,45	0,00	5,81	4,35	**12,60**	4,12	**16,73**	0,00
4	0,00	0,00	11,95	3,02	6,23	54,20	**75,41**	6,78	**82,19**	0,00
$1'_m Z^P$	**0,00**	**0,76**	**35,51**	**62,47**	**14,29**	**58,55**	**171,58**	**14,03**	**185,60**	

Nota: los encabezados numéricos de la matiz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.3. Cuentas satélite con PINH (10^6 bep)

		$\tilde{S}^P$	1	2	3	4	5	6
$dn^P - 1'_m Z^P$	Insumos satélite	is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00
	Residuos	w^P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Emisiones	e^P	0,00	0,00	16,14	1,81	0,00	0,00
	Oferta total	x^{PE}	17,84	68,86	16,73	82,19	14,29	58,55
	Recursos primarios	r^P	17,84	211,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	Importaciones	ri^P	0,00	0,00	0,05	42,30	0,00	0,00
	Exportaciones	re^P	0,00	139,05	0,25	17,53	0,00	0,00
$ri^P - re^P$	Importaciones netas	rin^P	0,00	-139,05	-0,20	24,76	0,00	0,00
	Variación de inventarios	vi^P	0,00	0,25	0,00	-0,21	0,00	0,00
	Consumo propio + pérdidas	cp^P	0,00	0,76	2,45	3,02	0,00	0,00
$vi^P - cp^P$	Variación neta de inventarios	vin^P	0,00	-0,51	-2,45	-3,24	0,00	0,00
	No aprovechado	na^P	0,00	3,84	0,00	0,00	0,00	0,00
$1'_m Z^P + r^P + rin^P + vin^P - na^P$		dn^P	17,84	68,86	32,86	83,99	14,29	58,55
$dn^P + w^P - e^P - x^{PE}$			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Este cálculo se realiza desde la construcción de la matriz de cuentas satélites que propuse en el primer capítulo. Esta matriz, que denomino $\tilde{\mathbf{S}}^{P}$, la planteo de la siguiente forma:

$$\tilde{\mathbf{S}}^{P}=\tilde{\mathbf{D}}^{S}\,(\hat{\mathbf{x}}^{PE}-\widehat{\mathbf{1}'_{m}\mathbf{Z}^{P}})$$

De modo que $\tilde{\mathbf{D}}^{S}=\tilde{\mathbf{S}}^{P}(\hat{\mathbf{x}}^{PE}-\widehat{\mathbf{1}'_{m}\mathbf{Z}^{P}})^{-1}$ (tabla 3.4).

Completo con esta información los requerimientos de la tabla insumo-producto física del análisis (tabla 3.5).

Esta matriz, como se verá más adelante, es diferente de la matriz insumo-producto energética que resulta del supuesto de precios homogéneos. Si bien ambas matrices miden flujos de energía, se deben interpretar desde lecturas distintas. La matriz que he construido ahora muestra los intercambios de energía desde las restricciones de la transformación física para procesar fuentes primarias y convertirlas en fuentes secundarias. Mientras que la matriz física que presentaré en la siguiente sección mostrará la dimensión física de las transacciones económicas, es decir, cuántas unidades de energía circulan por efecto de las transacciones económicas. Esta matriz, en cambio, se origina en los intercambios que resultan del proceso de transformación física de los recursos. En ese contexto, la definición de los precios del intercambio será fundamental en el resultado físico. Por esta razón, este tipo de construcción puede mostrar menor viabilidad práctica que la construcción basada en precios promedio. Esa es una importante limitación que se identifica en este caso.

Ahora, calculo la intensidad energética del consumo intermedio (tabla 3.6), que también se conoce como coeficientes energéticos directos, en analogía a la matriz de coeficientes técnicos del modelo tradicional de Leontief:

$$\mathbf{D}=\mathbf{Z}^{P}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

Esta matriz presenta la cantidad de energía del tipo **k** que se requiere de forma directa para producir cada 1000 dólares de la oferta que genera el sector **j**. Por ejemplo, se requieren 10,76 bep de insumos energéticos para producir 1000 dólares de la oferta nacional de derivados de petróleo (el sector 4). Estos insumos constituyen principalmente fuentes no renovables que requieren el proceso de transformación para la producción de derivados.

Esta, sin embargo, es una lectura relativa de los resultados. En términos absolutos, a través del consumo intermedio $\mathbf{Z}^{P}\mathbf{1}_{m}$, equivalente a $\mathbf{Dx}$, se calcula que para disponer de la oferta económica total se requieren de forma directa 172 millones de bep, de los cuales el 10 % son fuentes renovables; el 39 %, fuentes no renovables; el 7 %, electricidad, y el 44 % restante de los insumos constituyen derivados de petróleo. Por último, abastecer la demanda final requiere un total de 14 millones de bep de las diversas fuentes energéticas y la mitad de este valor corresponde a derivados de petróleo. Estas cifras indican que desde el procesamiento de las diversas fuentes de energía, la mayor parte del consumo se concentra en la transformación antes que en el consumo final.

Tabla 3.4. Coeficientes técnicos de los flujos ecológicos con PINH

$\tilde{D}^S$	1	2	3	4	5	6
$\tilde{d}_1^S(is^P)$	1,00	1,00	0,14	1,09	0,00	0,00
$\tilde{d}_2^S(w^P)$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\tilde{d}_3^S(e^P)$	0,00	0,00	-0,86	0,09	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.5. Matriz de flujos energéticos con PINH (10^6 bep)

Z^P	1	2	3	4	5	6	$Z^P 1_n$	f^P	x^P	$Z^P 1_n + f^P - x^P$
1	0,00	0,00	14,29	0,13	1,93	0,00	**16,35**	1,49	**17,84**	0,00
2	0,00	0,76	6,83	59,31	0,32	0,00	**67,22**	1,64	**68,86**	0,00
3	0,00	0,00	2,45	0,00	5,81	4,35	**12,60**	4,12	**16,73**	0,00
4	0,00	0,00	11,95	3,02	6,23	54,20	**75,41**	6,78	**82,19**	0,00
$1'_m Z^P$	**0,00**	**0,76**	**35,51**	**62,47**	**14,29**	**58,55**	**171,58**	**14,03**	**185,60**	
is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00				
w^P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
e^P	0,00	0,00	16,14	1,81	0,00	0,00				
x^{PE}	17,84	68,86	16,73	82,19	**14,29**	**58,55**				
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$1'_m Z^P + is^P + w^P - e^P - x^{PE}$			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.6. Intensidad energética directa con PINH (bep/10^3 $ de 2007)

D	1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	6,11	0,02	0,04	0,00
2	0,00	0,08	2,92	10,22	0,01	0,00
3	0,00	0,00	1,05	0,00	0,13	0,06
4	0,00	0,00	5,11	0,52	0,13	0,71
	0,00	**0,08**	**15,19**	**10,76**	**0,31**	**0,76**

Nota: los encabezados de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.7. Intensidad energética total con PINH (bep/10^3 $ de 2007)

ε	1	2	3	4	5	6
1	5,20	0,06	6,41	0,05	0,12	0,08
2	1,22	0,81	5,19	14,67	0,34	0,60
3	0,05	0,05	4,19	0,01	0,19	0,12
4	0,31	0,38	5,62	6,89	0,43	1,05
$1'_m \varepsilon$	**6,78**	**1,29**	**21,41**	**21,62**	**1,07**	**1,85**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Los coeficientes de intensidad energética total, definidos por la matriz ε, permiten analizar la cantidad total de energía del tipo **k** que se requiere de manera directa e indirecta por cada dólar de la producción del sector **j** que será necesaria para abastecer el consumo final (tabla 3.7).

$$\varepsilon = \mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}^f$$

Presento a continuación estos resultados. Se requiere aproximadamente 1 bep de las diferentes fuentes de energía para generar 1000 dólares (a precios de 2007) de la producción industrial para abastecer de manera directa e indirecta el consumo final de la industria. Sin embargo, este sector es el de menor requerimiento energético en la economía nacional. En el agregado, por cada 1000 dólares de la producción de toda la economía se requieren 54 bep de las diversas fuentes, principalmente fuentes no renovables y derivados de petróleo, para abastecer el consumo final del sistema. Los sectores de electricidad y derivados de petróleo son los principales consumidores y en conjunto abarcan el 80 % de las necesidades energéticas directas e indirectas del sistema.

¿Cómo se relacionan estos resultados con los coeficientes energéticos derivados del modelo de unidades híbridas? La matriz ε^H que muestra para el modelo de unidades híbridas los requerimientos totales de energía del sistema por cada 1000 dólares de la producción es de 77 bep en el caso de retornos energéticos constantes, y de 87 bep en el caso de retornos energéticos decrecientes. En contraste con el resultado de este modelo basado en precios no homogéneos que determina un requerimiento de solo 54 bep. En estas condiciones, parecería estar claro que el concepto de intensidad energética o su recíproco, los precios implícitos, pueden conducir a una subestimación de las necesidades energéticas del sistema. No obstante, antes de aseverarlo será necesario reflexionar sobre la comparabilidad de los resultados.

Los cálculos de intensidad energética que presento en este capítulo como ε no se pueden contrastar con su similar en el modelo de unidades híbridas ε^H, porque en este último se analizan los requerimientos que se hallan asociados a los intercambios energéticos y a los económicos, medidos en unidades híbridas. En cambio, ε identifica, de manera general, los requerimientos asociados a los intercambios energéticos que

responden a transacciones económicas cuando se trabaja sobre el modelo de precios implícitos homogéneos, y los requerimientos asociados a los intercambios de carácter energético propiamente dichos para el caso del modelo de precios implícitos no homogéneos. Aunque estos aspectos hacen que estos modelos no sean comparables, siempre será importante, además, definir el sistema de precios, que no es un elemento trivial en la construcción de matrices físicas. Dejaré la conclusión sobre la comparación entre los resultados de los modelos de unidades híbridas y de precios implícitos para la siguiente sección, en la que completo los resultados correspondientes al modelo que desarrollo en este capítulo.

Modelo de intensidad energética a partir de precios homogéneos

En esta aplicación del modelo presento resultados para el Ecuador con información de 2016 agregada para **n = 6** sectores, de los cuales **m = 4** son sectores energéticos. Como ya he explicado, esta agregación tiene fines expresamente didácticos. La aplicación desagregada para 17 sectores se presenta en el capítulo 4, la cual comprende, además de una estructura sectorial más amplia, el análisis del período 2010-2016. En los resultados se muestran discrepancias al contrastar las aplicaciones para seis y para 17 sectores, diferencias que interpreto como una pérdida de información debido a la agregación, aunque la condición de conservación se verifica en ambas escalas de análisis. Otro aspecto es que notaré a la estructura de precios de este modelo de precios implícitos homogéneos como (PIH).

El punto de inicio es la matriz de intercambios económicos, en la que se describe información para los siguientes sectores energéticos:

1. Recursos renovables (caña de azúcar, leña, hidroenergía),
2. Recursos no renovables (gas natural y petróleo crudo),
3. Electricidad,
4. Derivados de petróleo (gasolinas y alcoholes, diésel, *fuel oil*, kerosene y *jet fuel*, gas licuado y otros gases, otras energías secundarias).

Asimismo, en esta matriz se describe los siguientes sectores económicos:

5. Industria,
6. Los demás (agricultura, pesca y minería; construcción; comercial, servicios, sector público; transporte y almacenamiento).

Para este propósito, utilizo la matriz de transacciones económicas intersectoriales que apliqué en el caso del método de unidades híbridas (tabla 3.8).

En este caso, la única información de partida que dispongo respecto de los intercambios energéticos corresponde a la oferta total por sectores (tabla 3.9).

Tabla 3.8. Matriz de flujos económicos con PIH (10^6 $ de 2007)

Z	1	2	3	4	5	6	$Z1_n$	f	x
1	430	80	734	0	626	510	**2 381**	295	**2 676**
2	24	13	42	628	4	8	**720**	8 274	**8 994**
3	49	31	84	3	256	572	**994**	1 343	**2 338**
4	156	180	259	1 731	395	1 965	**4 686**	1 120	**5 806**
5	119	352	123	35	9 105	11 305	**21 039**	25 406	**46 446**
6	223	2 807	184	89	7 456	15 711	**26 471**	50 115	**76 586**
$1'_nZ$	**1 003**	**3 463**	**1 426**	**2 485**	**17 841**	**30 072**	**56 291**	**86 554**	**142 845**
l	1 673	5 531	911	3 320	28 604	46 514			
x'	**2 676**	**8 994**	**2 338**	**5 806**	**46 446**	**76 586**			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.9. Oferta total de energía con PIH (10^6 bep)

Sectores energéticos	x^P
1	18
2	69
3	17
4	82
$\sum_{k=1}^{m} x_k^P$	**186**

Nota: los encabezados numéricos del vector son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad, y (4) derivados de petróleo.

Tabla 3.10. Precios promedio de la energía por sectores ($ de 2007/bep)

Sectores energéticos	$\bar{p}_k = \frac{x_k}{x_k^P}$
1	150
2	131
3	140
4	71

Nota: los encabezados numéricos del vector son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad, y (4) derivados de petróleo.

En el modelo de precios implícitos que se basa en precios promedio sectoriales se busca definir a partir de estas matrices la matriz insumo-producto en unidades físicas. En ese contexto, el primer paso consiste en calcular los precios sectoriales $\bar{p}$ (tabla 3.10), que servirán de base para construir la matriz física como defino a continuación:

$$\bar{\mathbf{p}}_{k\times 1} = [\bar{p}_k] = \begin{cases} \frac{x_k}{x_k^P} \text{ para } x_k^P \neq 0 \\ 0 \text{ para } x_k^P = 0 \end{cases}$$

Como he explicado, la matriz de flujos energéticos $\mathbf{Z}^P$ (tabla 3.11) se estima a partir del vector $\bar{\mathbf{p}}$ y la matriz de intercambios económicos $\mathbf{Z}$. Similarmente, se combina también el vector de precios con la demanda final $\mathbf{f}$ y la oferta total $\mathbf{x}$, ambas expresadas en dólares. Esta información sirve para determinar la demanda final $\mathbf{f}^P$ y la oferta total $\mathbf{x}^P$ en unidades físicas:

$$\mathbf{Z}^P_{m\times n} = [\, z_{kj}^P \,] = \begin{cases} \frac{z_{kj}}{\bar{p}_k} \text{ si } \bar{p}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } \bar{p}_k = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{f}^P_{m\times 1} = [f_k^P] = \begin{cases} \frac{f_k}{\bar{p}_k} \text{ si } \bar{p}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } \bar{p}_k = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^P_{m\times 1} = [x_k^P] = \begin{cases} \frac{x_k}{\bar{p}_k} \text{ si } \bar{p}_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } \bar{p}_k = 0 \end{cases}$$

Esta matriz, sin embargo, se halla incompleta. Es necesario incorporar la matriz de cuentas satélite que incluye los insumos netos, los residuos y las emisiones. Para ello, considero mi propuesta $\tilde{\mathbf{S}}^P$, que ajusta los vectores satélite según la estructura de la matriz de flujos físicos, en particular porque la matriz $\mathbf{Z}^P$ muestra una estructura similar a la matriz $\mathbf{Z}$ de los intercambios económicos entre sectores. Por lo tanto, el valor de $\mathbf{1'}_m\mathbf{Z}^P$ también se modifica en esta versión del modelo, lo cual introduce cambios en la composición de las cuentas satélite al hallarse fuera de equilibrio la condición de conservación, porque esta responde a la estructura de los intercambios energéticos, no a las transacciones económicas que he analizado desde los precios homogéneos (tabla 3.12).

$$\mathbf{is}^P + \mathbf{w}^P - \mathbf{e}^P \neq \mathbf{x}^{PE} - \mathbf{1'}_m\mathbf{Z}^P$$

De aquí se pueden explicar las inconsistencias que argumentan Merciai y Heijungs (2014), respecto de la verificación de la condición de conservación en los modelos que sirven para construir matrices insumo-producto físicas a partir de tablas monetarias. Precisamente, la inconsistencia descansa en el uso de las mismas cuentas satélite para estructuras de intercambio distintas. Como he explicado, solamente se puede asumir que la cuenta de

Tabla 3.11. Matriz de flujos energéticos con PIH (10^6 bep)

Z^P	1	2	3	4	5	6	Z^P1_n	f^P	x^P
1	2,87	0,53	4,89	0,00	4,17	3,40	**15,87**	1,97	**17,84**
2	0,18	0,10	0,32	4,81	0,03	0,06	**5,51**	63,34	**68,86**
3	0,35	0,22	0,60	0,02	1,83	4,09	**7,11**	9,61	**16,73**
4	2,21	2,55	3,66	24,51	5,59	27,81	**66,33**	15,85	**82,19**
$1'_mZ^P$	**5,62**	**3,40**	**9,48**	**29,33**	**11,62**	**35,37**	**94,83**	**90,78**	**185,60**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.12. Condición de conservación (10^6 bep)

	1	2	3	4	5	6
$1'_mZ^P$	5,62	3,40	9,48	29,33	11,62	35,37
is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00
w^P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
e^P	0,00	0,00	16,14	1,81	0,00	0,00
x^{PE}	17,84	68,86	16,73	82,19	11,62	35,37
$is^P + w^P - e^P$	17,84	68,10	-18,79	19,72	0,00	0,00
$x^{PE} - 1'_mZ^P$	12,22	65,45	7,25	52,85	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.13. Matriz de flujos energéticos con PIH (10^6 bep)

Z^P	1	2	3	4	5	6	Z^P1_n	f^P	x^P
1	2,87	0,53	4,89	0,00	4,17	3,40	**15,87**	1,97	**17,84**
2	0,18	0,10	0,32	4,81	0,03	0,06	**5,51**	63,34	**68,86**
3	0,35	0,22	0,60	0,02	1,83	4,09	**7,11**	9,61	**16,73**
4	2,21	2,55	3,66	24,51	5,59	27,81	**66,33**	15,85	**82,19**
$1'_mZ^P$	**5,62**	**3,40**	**9,48**	**29,33**	**11,62**	**35,37**	**94,83**	**90,78**	**185,60**
is^P	17,84	68,10	-2,65	21,53	0,00	0,00			
w^P	0,00	0,00	9,90	31,33	0,00	0,00			
e^P	5,62	2,64	0,00	0,00	0,00	0,00			
x^{PE}	**17,84**	**68,86**	**16,73**	**82,19**	**11,62**	**35,37**	$1'_mZ^P + is^P + w^P - e^P - x^{PE}$		

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

insumos netos corresponde a la misma que ya expuse en el modelo de precios no homogéneos, porque muestra la disponibilidad de insumos netos de la extracción doméstica, importaciones netas y cambios netos de los inventarios. Asimismo, será necesario recalcular los residuos y emisiones porque corresponderán en este caso a la dimensión física de las transacciones económicas y no a los intercambios del procesamiento de la energía (tabla 3.13).

Desde mi propuesta para la estimación de la matriz de cuentas satélite de los flujos ecológicos, se puede ver que los coeficientes técnicos correspondientes $\tilde{D}^S$ tienen una composición distinta a la que registré para el caso del modelo con precios implícitos no homogéneos, porque ambas constituyen estructuras de intercambio diferentes, por lo tanto, los residuos y emisiones también pueden ser distintos, como he verificado para las cuentas del caso ecuatoriano en 2016.

En el modelo con precios no homogéneos no registro cifras de residuos, solamente emisiones asociadas al proceso de transformación de la energía. En este modelo, en cambio, con precios homogéneos ambos rubros están presentes en las cuentas de balance. En particular, para la electricidad y los derivados de petróleo se registran residuos cuya contabilización implica que se trata de subproductos que resultan de las transacciones económicas, que en cierta fracción podrían tener algún uso económico posterior; mientras que en el caso de los recursos energéticos renovables y no renovables solamente se cuentan emisiones, cuyo uso económico posterior se halla inexorablemente perdido. A continuación, muestro el cálculo de la matriz $\tilde{\mathbf{D}}^S = \tilde{\mathbf{S}}^P(\hat{\mathbf{x}}^{PE} - \widehat{\mathbf{1}'_m\mathbf{Z}^P})^{-1}$ (tabla 3.14).

Este cálculo permite asegurar la conciliación del balance físico correspondiente a la matriz $\tilde{\mathbf{S}}^P$ para este modelo en particular, que se puede recuperar como $\tilde{\mathbf{S}}^P = \tilde{\mathbf{D}}^S(\hat{\mathbf{x}}^{PE} - \widehat{\mathbf{1}'_m\mathbf{Z}^P})$ conforme detallo en la última tabla de flujos energéticos.

Ahora calculo los parámetros básicos del modelo de precios implícitos. La intensidad energética (o su recíproco, que son los precios implícitos) asociada a los insumos se puede interpretar como un coeficiente energético directo del sistema, que mide las unidades energéticas que se requieren por cada dólar de la oferta económica, es decir: $\mathbf{D} = \mathbf{Z}^P(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$ (tabla 3.15).

Se determina que por cada 1000 dólares que se oferta de derivados de petróleo en el sistema económico (el sector 4) implica un requerimiento directo de 0,83 bep de fuentes no renovables de energía y 4,22 bep de derivados de petróleo. El requerimiento de energía de este sector suma en total 5,05 bep por cada 1000 dólares, que es aproximadamente la mitad de lo que se define al usar un modelo con precios no homogéneos (10,76 bep). Argumento que esta diferencia se debe a que en este modelo el requerimiento de insumos se origina en las transacciones económicas, mientras que en el de precios no homogéneos se origina en el proceso de transformación.

Ahora bien, la lectura de los requerimientos energéticos del sistema económico se puede hacer no solo en términos relativos a la oferta total en unidades monetarias, sino también en términos absolutos. Para ello, el requerimiento energético total del consumo intermedio interindustrial se puede definir a partir del producto **Dx**. Se calcula que el sistema requiere un total de 95 millones de bep para abastecer el consumo intermedio y de este valor los derivados de petróleo cuentan por 66 millones de bep. El abastecimiento energético de la demanda final es muy similar, bordea los 91 millones de bep, de los cuales

Tabla 3.14. Coeficientes técnicos de los flujos ecológicos (10^6 bep)

$\tilde{D}^S$	1	2	3	4	5	6
$\tilde{d}_1^S(is^P)$	1,46	1,04	-0,37	0,41	0,00	0,00
$\tilde{d}_2^S(w^P)$	0,00	0,00	1,37	0,59	0,00	0,00
$\tilde{d}_3^S(e^P)$	0,46	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.15. Intensidad energética directa con PIH (bep/10^3 $ de 2007)

D	1	2	3	4	5	6
1	1,07	0,06	2,09	0,00	0,09	0,04
2	0,07	0,01	0,14	0,83	0,00	0,00
3	0,13	0,02	0,26	0,00	0,04	0,05
4	0,83	0,28	1,57	4,22	0,12	0,36
$1'_mD$	**2,10**	**0,38**	**4,05**	**5,05**	**0,25**	**0,46**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.16. Intensidad energética total con PIH (bep/10^3 $ de 2007)

ε	1	2	3	4	5	6
1	8,03	0,13	2,64	0,03	0,18	0,13
2	0,18	7,71	0,35	1,19	0,03	0,05
3	0,18	0,06	7,49	0,02	0,07	0,09
4	1,59	0,69	2,94	20,30	0,42	0,77
Total	**9,97**	**8,58**	**13,42**	**21,53**	**0,69**	**1,03**

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

Tabla 3.17. Escenarios de intensidad energética (bep/10^3 $ de 2007)

		1	2	3	4	5	6	Total
PINH	ε^P	6,78	1,29	21,41	21,62	1,07	1,85	**54,01**
PIH	$\varepsilon^{\bar{P}}$	9,97	8,58	13,42	21,53	0,69	1,03	**55,23**
UHRC	ε^H	6,92	8,51	31,16	26,56	1,51	2,26	**76,93**
UHRD	ε^{**}	7,03	8,79	38,41	27,00	2,62	2,99	**86,84**

Nota: Los encabezados de fila son (PINH) precios implícitos no homogéneos; (PIH) precios implícitos homogéneos; (UHRC) unidades híbridas con retornos energéticos constantes, y (UHRD) unidades híbridas con retornos energéticos decrecientes. Los encabezados de columna son (1) primarios renovables; (2) primarios no renovables; (3) electricidad; (4) derivados de petróleo; (5) industria, y (6) los demás.

63 millones son recursos energéticos no renovables. Estas cifras indican que el consumo energético que definen las transacciones económicas se distribuye de manera más o menos equitativa entre el consumo intermedio y el consumo final.

Por último, defino la matriz de coeficientes de intensidad energética total ε que se podrá comparar con ε^H del modelo de unidades híbridas (tabla 3.16):

$$\varepsilon = \mathbf{D}[\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1} + \tilde{\mathbf{Q}}^f$$

Se interpreta que por cada 1000 dólares que consume la industria nacional (el sector 5) se requieren de manera directa e indirecta 0,18 bep de fuentes renovables de energía, 0,03 bep de fuentes no renovables, 0,07 bep de electricidad y 0,42 bep de derivados de petróleo. En suma, se requieren 0,69 bep de las diferentes fuentes de energía para cubrir 1000 dólares del consumo industrial. Esta cifra es apenas el 65 % de la intensidad energética que calculo en el modelo de precios implícitos no homogéneos. Sin embargo, el sector industrial tiene menos necesidades energéticas que los demás. A través de la matriz ε se identifica que en comparación a la industria, el resto de los sectores económicos requieren 1,5 veces más energía por cada 1000 dólares de su consumo, y las brechas respecto de las necesidades energéticas de los propios sectores energéticos son aún más amplias. Los derivados del petróleo, la electricidad, las fuentes renovables y las fuentes no renovables requieren 31, 19, 14, y 12 veces más energía que la industria por cada 1000 dólares de producción necesaria para abastecer su consumo final.

Con estos resultados puedo contrastar cuatro escenarios de intensidad energética para el Ecuador en 2016, los cuales resumo en la tabla 3.17.

Como he explicado en el capítulo previo, la introducción de un sistema de precios para el análisis del intercambio intersectorial permite generar resultados en términos físicos que son consistentes con los principios de conservación de la materia y la energía. Estos intercambios, sin embargo, únicamente reflejan la dimensión física de las transacciones económicas cuando se trata del modelo con precios implícitos homogéneos. Entonces, si el modelo con precios implícitos no homogéneos refleja propiamente los intercambios energéticos para el Ecuador en 2016, debería ser comparable con los resultados que provee el modelo de unidades híbridas. Sin embargo, el modelo de unidades híbridas tiene una ventaja importante. En efecto, este modelo muestra cada uno de los flujos que se intercambian en las transacciones económicas y energéticas en sus propias unidades de medida y sobre esta base se traduce a unidades energéticas los requerimientos del sistema.

En el caso del modelo de intensidades energéticas, en cambio, los precios implícitos son el puente que se tiende entre las estructuras de intercambios económicos y energéticos. Los precios, como se ha visto, son en este contexto fundamentales para la conversión a unidades físicas.

En estos dos últimos capítulos he trabajado a partir de matrices insumo-producto en unidades monetarias y energéticas que son idénticas para ambos modelos. Con los antecedentes expuestos y los resultados obtenidos confirmo que estos dos modelos proveen información diferente. Aunque hallo cierta proximidad entre los resultados del modelo de unidades híbridas con retornos energéticos constantes de escala y el modelo de precios

implícitos para precios no homogéneos, sus estructuras y su escala son definitivamente distintas, es decir, 54:77 bep por cada 1000 dólares de la oferta total disponible.

Mi recomendación se inclina por el uso del modelo de unidades híbridas, siempre que la disponibilidad de información así lo permita. No obstante, cuando este tipo de aplicación no resulte viable, he planteado en este capítulo las condiciones de balanceo consistentes que permiten verificar el principio de conservación también en el modelo de precios implícitos. El uso de una estructura homogénea o no homogénea de precios dependerá de los fines de la investigación planteada. Si el interés son los circuitos de intercambio físico necesarios para los procesos de transformación de la energía, por ejemplo, el modelo con precios no homogéneos será el indicado. Si el interés es la dimensión física de las transacciones económicas, se deberá optar por el modelo con precios implícitos homogéneos.

¿Inconsistencias termodinámicas o inconsistencias interpretativas?

Probablemente sí se puede hablar de una inconsistencia termodinámica cuando diferentes niveles de precios determinan, como es lógico, diferentes matrices insumo-producto en unidades físicas. Precisamente, lo que demuestran estas diferencias es que la definición de los precios implícitos no es una cuestión trivial. Argumento, sin embargo, que será fundamental identificar qué tipo de intercambios se interpretan antes que atacar directamente la construcción de una matriz insumo-producto física.

Con este propósito, en esta sección reproduzco el ejemplo numérico propuesto por Merciai y Heijungs (2014, 69), quienes a partir de una matriz insumo-producto monetaria buscan ilustrar las inconsistencias en el balance de masa cuando difieren los precios por comprador. Según estos autores "el inconveniente radica en el uso de precios homogéneos, que determinan una discrepancia en las unidades físicas entre lo que se usa y lo que se requiere dentro y entre las actividades". El propósito de reproducir este ejemplo es analizar las inconsistencias que argumentan los autores, refutarlas y demostrar que el problema central no radica en la inconsistencia estructural de los modelos de precios implícitos, sean estos homogéneos o no, sino en la inconsistente lectura de sus resultados. En otras palabras, el problema surge porque se pretende aplicar la misma lectura a estructuras que muestran distintas representaciones y declarar inconsistencias sobre esa base. Argumento que la dificultad es, en su lugar, de carácter interpretativo antes que termodinámico. Por ello, resulta que la aplicación del principio de conservación de la materia en dicha aplicación es incorrecta.

Tomo el ejemplo de Merciai y Heijungs (2014), cuya adaptación en lo posterior identificaré como MH (2014). Se parte de una economía de 3 sectores: 1) agricultura, 2) manufacturas y 3) energía. A continuación, presento la matriz y vectores de intercambios económicos $\mathbf{Z}$, $\mathbf{f}$ y $\mathbf{x}$. Además, agrego las respectivas condiciones de balance, que determinan la igualdad entre los totales de las filas y columnas de esta tabla monetaria (tabla 3.18).

Ahora, presento la matriz de precios $\mathbf{P}$, la cual contiene una columna con las unidades de medida correspondientes, el vector de precios del consumo final $\mathbf{p}^{f}$ y los precios de la oferta total $\mathbf{p}^{x}$ (tabla 3.19).

Con estos elementos se obtiene la matriz de intercambios físicos (tabla 3.20) que se calcula así:

$$\mathbf{Z}^{P}_{m\times n} = [\mathbf{z}^{P}_{kj}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{z}_{kj}}{\mathbf{p}_{kj}} \text{ si } \mathbf{p}_{kj} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } \mathbf{p}_{kj} = \mathbf{0} \end{cases}$$

De forma similar, se computan los vectores de consumo final $\mathbf{f}^{P}$ y oferta total $\mathbf{x}^{P}$ en unidades físicas (tabla 3.20):

$$\mathbf{f}^{P}_{m\times 1} = [\mathbf{f}_{k}{}^{P}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{f}_{k}}{\mathbf{p}^{f}_{k}} \text{ si } \mathbf{p}^{f}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } \mathbf{p}^{f}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{P}_{m\times 1} = [\mathbf{x}^{P}_{k}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{x}_{k}}{\mathbf{p}^{x}_{k}} \text{ si } \mathbf{p}^{x}_{k} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } \mathbf{p}^{x}_{k} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{PE}_{1\times n} = [\mathbf{x}^{P}_{j}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{x}_{j}}{\mathbf{p}_{j}{}^{x}} \text{ si } \mathbf{p}^{x}_{j} \neq \mathbf{0} \\ 0 \text{ si } \mathbf{p}^{x}_{j} = \mathbf{0} \end{cases}$$

Necesito agregar la matriz de cuentas satélite $\mathbf{S}^{P}$, de dimensión **2 x 3,** que contiene recursos y emisiones para cada sector económico, la cual permitirá verificar la consistencia de la tabla híbrida respecto de la condición de conservación. Estos valores se hallan medidos en unidades de masa, en este caso kilogramos. Mantengo la notación que he utilizado, con ello, los recursos serán $\mathbf{is}^{P}$ (insumos satélite) y las emisiones, $\mathbf{e}^{P}$; mientras que los subíndices indicarán a qué unidad de medida corresponde cada vector (kg o MJ). Cuando no escribo estos subíndices, se entiende que las expresiones aplican para ambos casos (tabla 3.21).

Cabe anotar que haré una corrección a la vinculación de esta matriz con la tabla insumo-producto física. Esta corrección tiene por objeto expresar adecuadamente el principio de conservación, en particular, el balance de materia para este caso. En la propuesta de Merciai y Heijungs (2014), la matriz $\mathbf{S}^{P}$, que he llamado de cuentas satélite, se define también a partir de precios implícitos al vincular los recursos y las emisiones con la oferta total en unidades monetarias, en la matriz de intensidad ecológica $\mathbf{D}^{S}$. Hay que recordar que la intensidad ecológica siempre corresponde al coeficiente inverso respecto de los precios: $\mathbf{D}^{S} = \mathbf{S}^{P}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$. En donde se podrá recuperar la matriz de cuentas satélite por la operación $\mathbf{S}^{P} = \mathbf{D}^{S}(\hat{\mathbf{x}})$. Estas matrices se estimanen la tabla 3.22.

A partir de la revisión de este ejemplo se puede ver que esta definición es incorrecta, porque solo evidencia los cambios en la estructura económica del sistema, mas no las implicaciones de dichos cambios en la dimensión física, que son fundamentales para evidenciar los cambios en las condiciones de balance para verificar el principio de conservación de la materia. Más adelante haré una propuesta para corregir este problema.

Tabla 3.18. Matriz insumo-producto (€). MH (2014)

Z	1	2	3	$Z1_n$	f	x	$Z1_n + f - x$
1	0,00	1,00	2,00	**3,00**	4,00	**7,00**	0,00
2	1,60	0,00	3,00	**4,60**	3,60	**8,20**	0,00
3	3,00	3,00	0,00	**6,00**	1,50	**7,50**	0,00
$1'_nZ$	**4,60**	**4,00**	**5,00**	**13,60**	**9,10**	**22,70**	**0,00**
1	2,40	4,20	2,50				
x'	**7,00**	**8,20**	**7,50**				
$1'_nZ + 1 - x'$	0,00	0,00	0,00				

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.19. Matriz de precios unitarios. MH (2014)

P		1	2	3	p^f	p^x
€/kg	**1**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
€/kg	**2**	0,80	0,80	1,00	1,20	1,03
€/MJ	**3**	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.20. Matriz de flujos físicos con PINH. MH (2014)

	Z^P	1	2	3	Z^P1_n	f^P	x^P	$Z^P1_n + f^P - x^P$
kg	**1**	0	1	2	**3**	4	7	0
kg	**2**	2	0	3	**5**	3	**8**	0
MJ	**3**	2	2	0	**4**	1	**5**	0
kg	**$1'_{kg}Z^P$**	**2**	**1**	**5**	**8**	7	**15**	**0**
MJ	**$1'_{MJ}Z^P$**	**2**	**2**	**0**	**4**	**1**	**5**	**0**
Donde		**$1'_{kg}$ = (1, 1, 0) y $1'_{MJ}$=(0, 0, 1)**						

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.21. Cuentas satélite (kg). MH (2014)

S^P_{kg}	1	2	3
is^P_{kg}	8	9	0
e^P_{kg}	3	2	5

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

En la tabla 3.23 insumo-producto física he agregado la condición de conservación de la materia que se aplica a este ejemplo, condición que constituye un balance de masa para verificar que el sistema es consistente. En el ejemplo original, sin embargo, no consta el balance de energía. He añadido valores de recursos energéticos y sus emisiones, los cuales son operativos para este ejemplo porque permiten construir el balance de energía, aunque debo advertir que con otros valores también podría obtenerse el mismo resultado. A fin de comprobar el principio de conservación en ambos balances, he incorporado bajo la tabla física insumo-producto dos secciones que muestran las cuentas satélite de balance.

Desde esta estructura se verifica la consistencia del balance de materia (y de energía). No obstante, a partir de la simulación de un cambio en la demanda final, los autores demuestran que se introducen inconsistencias en el balance de materia. A continuación expongo este caso mediante la nueva tabla de intercambios económicos (tabla 3.24), que incluye un aumento en la demanda final por manufacturas. Notaré los cambios en las matrices y vectores por un supraíndice con el valor de 1 en los vectores de oferta total $\mathbf{x}^1$, demanda final $\mathbf{f}^1$ y en la matriz de intercambios interindustriales $\mathbf{Z}^1$.

Para obtener estos valores, se asume que la estructura de intercambios interindustriales se mantiene constante, es decir, la matriz de coeficientes técnicos **A** se mantiene constante. De esta forma, la oferta total se incrementa por el cambio en la demanda final, y, por medio del cambio en la oferta, se estima la variación en los intercambios interindustriales, tal como indico a continuación:

$$\mathbf{x}^1 = [\mathbf{I}_n - \mathbf{A}]^{-1}\,\mathbf{f}^1$$

$$\mathbf{Z}^1 = \mathbf{A}\,\hat{\mathbf{x}}^1$$

Al aplicar el método de precios implícitos, se requiere estimar una nueva matriz insumo-producto física. ¿Cómo se traducen estos cambios en esta matriz física? Noto los cambios también a partir de un supraíndice 1. En este caso se mantiene la estructura de precios unitarios original definida como **P**, $\mathbf{p}^f$ y $\mathbf{p}^x$, pero se observa el efecto en la matriz de intercambios interindustriales en términos físicos $\mathbf{Z}^{P1}$, los vectores físicos de demanda final $\mathbf{f}^{P1}$ y la oferta total $\mathbf{x}^{P1}$ a partir de la nueva oferta total $\mathbf{x}^1$ y la nueva demanda final $\mathbf{f}^1$ en unidades monetarias. Las formulaciones correspondientes son:

$$\mathbf{Z}^{P1}_{m\times n} = [z^{P1}_{kj}] = \begin{cases} \dfrac{z^1_{kj}}{p_{kj}} \text{ si } p_{kj} \neq 0 \\ 0 \text{ si } p_{kj} = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{f}^{P1}_{m\times 1} = [\,f^{P1}_k\,] = \begin{cases} \dfrac{f^1_k}{p^f_k} \text{ si } p^f_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } p^f_k = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{P1}_{m\times 1} = [\,x^{P1}_k\,] = \begin{cases} \dfrac{x^1_k}{p^x_k} \text{ si } p^x_k \neq 0 \\ 0 \text{ si } p^x_k = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{x}^{PE1}_{1\times n} = [\,x^{P1}_j\,] = \begin{cases} \dfrac{x^1_j}{p^x_j} \text{ si } p^x_j \neq 0 \\ 0 \text{ si } p^x_j = 0 \end{cases}$$

Tabla 3.22. Intensidad ecológica (kg/€). MH (2014)

D^{S}_{kg}	1	2	3
$d^{s}_{1kg}\,(is^{P}_{kg})$	1,14	1,10	0,00
$d^{s}_{2kg}\,(e^{P}_{kg})$	0,43	0,24	0,67

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.23. Matriz de flujos físicos con PINH. MH (2014)

Z^{P}		1	2	3	$Z^{P}1_{n}$	f^{P}	x^{P}	$Z^{P}1_{n} + f^{P} - x^{P}$
kg	**1**	0	1	2	**3**	4	7	0
kg	**2**	2	0	3	**5**	3	**8**	0
MJ	**3**	2	2	0	**4**	1	**5**	0
kg	$\mathbf{1'_{kg}Z^{P}}$	**2**	**1**	**5**				
kg	$\mathbf{is^{P}_{kg}}$	8	9	0				
kg	$\mathbf{e^{P}_{kg}}$	3	2	5				
kg	$\mathbf{x^{PE}_{kg}}$	7	**8**	**0**				
kg		0	0	0	$\mathbf{1'_{kg}Z^{P} + is^{P}_{kg} - e^{P}_{kg} - x^{PE}_{kg}}$			
MJ	$\mathbf{1'_{MJ}Z^{P}}$	2	2	0				
MJ	$\mathbf{is^{P}_{MJ}}$	0	2	5				
MJ	$\mathbf{e^{P}_{MJ}}$	2	4	0				
MJ	$\mathbf{x^{PE}_{MJ}}$	**0**	**0**	**5**				
MJ		0	0	0	$\mathbf{1'_{MJ}Z^{P} + is^{P}_{MJ} - e^{P}_{MJ} - x^{PE}_{MJ}}$			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.24. Matriz insumo-producto y cambio en f^{1}_{2} (€). MH (2014)

Z^{1}	1	2	3	$Z^{1}1_{n}$	f^{1}	x^{1}	$Z^{1}1_{n} + f^{1} - x^{1}$
1	0,00	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,0
2	1,87	0,00	3,90	**5,77**	7,20	**12,97**	0,0
3	3,51	4,75	0,00	**8,25**	1,50	**9,75**	0,0
$\mathbf{1'_{n}Z^{1}}$	**5,38**	**6,33**	**6,50**				
$\mathbf{l^{1}}$	2,81	6,64	3,25				
$\mathbf{(x^{1})'}$	**8,18**	**12,97**	**9,75**				
	0,00	0,00	0,00	$\mathbf{1'_{n}Z^{1} + l^{1} - (x^{1})'}$			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Se obtiene como resultado la matriz insumo-producto física que muestra el cambio en la demanda final (tabla 3.25).

Ahora, hace falta incorporar las condiciones de balance para esta matriz. Siguiendo la formulación planteada por Merciai y Heijungs (2014), computo la nueva matriz de cuentas satélite de manera similar a los cálculos anteriores, es decir, se mantiene la estructura de precios implícitos del sistema de cuentas satélite y se observa su efecto en dichas cuentas a través del cambio en la oferta total en unidades monetarias de la siguiente manera: $\mathbf{S}^{P1} = \mathbf{D}^{S}(\hat{\mathbf{x}}^{1})$ (tabla 3.26).

Esta formulación, sin embargo, no cumple con la condición de conservación que corresponde (tabla 3.27).

La última línea del balance es inconsistente para el caso de las manufacturas. El argumento de Merciai y Heijungs (2014, 73) es que "el uso de una tabla de coeficientes monetarios como mecanismo de modelación en el análisis insumo-producto puede violar los balances físicos subyacentes y producir resultados sesgados". Concuerdo completamente con esta conclusión, y por ello, argumento que hace falta definir las condiciones de balance a partir de la matriz insumo-producto física que se ha construido desde una base monetaria. Esto significa que la base para definir la matriz de cuentas satélite no serían las intensidades ecológicas que se obtienen a partir de la oferta total en unidades monetarias (o su inverso, el precio de los flujos ecológicos). La razón es que desde la lectura de intensidades ecológicas se asume que estas se mantienen constantes con el cambio en la demanda final en unidades monetarias, lo que es un error porque en efecto existe una variación en $\mathbf{x}$ que modifica la matriz $\mathbf{D}^{S}$, por lo tanto, las estimaciones de las nuevas condiciones de balance son sesgadas.

¿Cómo se puede evitar estos sesgos? En lugar de considerar la intensidad ecológica propongo centrarse en la fracción de los flujos ecológicos (que notaré como $\tilde{\mathbf{D}}^{S}$), en este caso de recursos ($\mathbf{is}^{P}$) y emisiones ($\mathbf{e}^{P}$) en la oferta total en unidades físicas ajustada por los cambios en los flujos físicos interindustriales ($\mathbf{x}^{PE} - \mathbf{1}'\mathbf{Z}^{P}$). La siguiente formulación plantea esta propuesta:[7]

$$\tilde{\mathbf{D}}^{S} = [\tilde{d}_{sj}^{S}] = \begin{cases} \tilde{d}_{1j}^{S} = \dfrac{is_j^{P}}{x_j^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}^{P}} \\ \tilde{d}_{2j}^{S} = \dfrac{w_j^{P}}{x_j^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}^{P}} \\ \tilde{d}_{3j}^{S} = \dfrac{e_j^{P}}{x_j^{PE} - \sum_{k=1}^{m} z_{kj}^{P}} \end{cases}$$

$$\mathbf{is}^{P} - \mathbf{e}^{P} = \mathbf{x}^{PE} - \mathbf{1}'\mathbf{Z}^{P}$$

[7] Cabe notar que, en condiciones de equilibrio, esta formulación será equivalente a la siguiente:

$$\tilde{\mathbf{D}}^{S} = [\tilde{d}_{sj}^{S}] = \begin{cases} \tilde{d}_{1j}^{S} = \dfrac{is_j^{P}}{is_j^{P} - e_j^{P}} \\ \tilde{d}_{2j}^{S} = \dfrac{w_j^{P}}{is_j^{P} - e_j^{P}} \\ \tilde{d}_{3j}^{S} = \dfrac{e_j^{P}}{is_j^{P} - e_j^{P}} \end{cases}$$

Esta aclaración es importante porque, al modelar el sistema con precios homogéneos, esta identidad no se cumple con las mismas condiciones de partida. En ese contexto, será necesario estimar las condiciones que corresponden a ese caso en particular.

Tabla 3.25. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1 . MH (2014)

	Z^{P1}	1	2	3	$Z^{P1}1_n$	f^{P1}	x^{P1}	$Z^{P1}1_n + f^{P1} - x^{P1}$
kg	**1**	0,00	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,0
kg	**2**	2,34	0,00	3,90	**6,24**	6,00	**12,24**	0,0
MJ	**3**	2,34	3,16	0,00	**5,50**	1,00	**6,50**	0,0
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	**2,34**	**1,58**	**6,50**				
MJ	$1'_{MJ}Z^{P1}$	**2,34**	**3,16**	**0,00**				

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.26. Cuentas satélite con PINH y cambio en f_2^1 (kg). MH (2014)

S_{kg}^{P1}	1	2	3
is_{kg}^{P1}	9,35	14,24	0,00
e_{kg}^{P1}	3,51	3,16	6,50

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.27. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1, sin cumplir la condición de conservación. MH (2014)

	Z^{P1}	1	2	3	$Z^{P1}1_n$	f^{P1}	x^{P1}	$Z^{P1}1_n + f^{P1} - x^{P1}$
kg	**1**	0,0	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,0
kg	**2**	2,34	0,00	3,90	**6,24**	6,00	**12,24**	0,0
MJ	**3**	2,34	3,16	0,00	**5,50**	1,00	**6,50**	0,0
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	**2,34**	**1,58**	**6,50**				
kg	is_{kg}^{P1}	9,35	14,24	0,00				
kg	e_{kg}^{P1}	3,51	3,16	6,50				
kg	x_{kg}^{PE1}	**8,18**	**12,24**	**0,00**				
kg		0,00	0,42	0,00	$1'_{kg}Z^{P1} + is_{kg}^{P1} - e_{kg}^{P1} - x_{kg}^{PE1}$			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.28. Intensidad ecológica con PINH y cambio en f_2^1 sin cumplir la condición de conservación. MH (2014)

		$\tilde{D}_{kg}^{S}$	1	2	3
kg	(a)/(e)	$d_{1kg}{}^{S}(is_{kg}^{P})$	1,60	1,29	0,00
kg	(b)/(e)	$d_{2kg}{}^{S}(e_{kg}^{P})$	0,60	0,29	-1,00
kg	(a)	is_{kg}^{P}	8,00	9,00	0,00
kg	(b)	e_{kg}^{P}	3,00	2,00	5,00
kg	(c)	$1'_{kg}Z^{P}$	2,00	1,00	5,00
kg	(d)	x_{kg}^{PE}	7,00	8,00	0,00
kg	(e) = (a) - (b)	$is_{kg}^{P} - e_{kg}^{P} = x_{kg}^{PE} - 1'_{kg}Z^{P}$	5,00	7,00	-5,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Esta última expresión es otra forma de escribir la identidad contable básica del modelo en unidades físicas. Con estos elementos, la matriz de vectores satélite se obtendrá de la siguiente manera, en términos matriciales:

$$\tilde{S}^{P} = \tilde{D}^{S} (\hat{x}^{PE} - \widehat{1' Z^{P}})$$

De esta manera, se incluyen en el cálculo las modificaciones que sufre tanto la oferta en unidades monetarias como los flujos físicos, por lo tanto, se evita el sesgo introducido al considerar intensidades energéticas constantes.

Calculo una nueva matriz de cuentas satélite $\tilde{S}^{P1}$, que refleje la propagación de todos los cambios que se originan en la variación de la demanda final. Para ello, considero en primer lugar el cómputo de la matriz $\tilde{D}^{S}$ que presento a continuación. Incluyo, para fines explicativos, una columna que indica las operaciones correspondientes (tabla 3.28).

El segundo elemento por estimar es la matriz diagonal formada por la oferta total ajustada por los flujos interindustriales en términos físicos (tabla 3.29).

Finalmente, corresponde calcular la nueva matriz de cuentas satélite $\tilde{S}^{P1}=\tilde{D}^{S} (\hat{x}^{P1} - \widehat{1' Z^{P1}})$ (tabla 3.30).

A partir de aquí, puedo reescribir la matriz insumo-producto física que se deriva de la aplicación del método de precios implícitos no homogéneos y que es, además, consistente con el principio de la conservación (tabla 3.31).

Esta matriz incluso se puede completar con el balance energético, para lo cual uso las condiciones que planteé en la primera matriz física que presenté en esta sección. Para ese caso, calculo la matriz $\tilde{D}^{S}$ que corresponde a las unidades energéticas (tabla 3.32).

La versión completa de la reformulación del ejemplo de Merciai y Heijungs (2014) para el incremento en la demanda final se muestran en la tabla 3.33.

Considero que esta formulación presenta dos ventajas. En primer lugar, permite verificar el principio de conservación; y, en segundo lugar, se plantea desde los componentes de la propia matriz física. Entonces, se puede aplicar con independencia de que el origen de la matriz física sea una tabla insumo-producto monetaria o física.

Esta formulación y también el esquema de balanceo de Merciai y Heijungs (2014), sin embargo, pueden mostrar una limitación que se refiere al tratamiento de los insumos físicos del sistema, es decir, respecto de la categoría que Merciai y Heijungs (2014) denominan "recursos". Podría asumirse que esta cuenta satélite no debe variar entre los métodos aplicados, pues no depende del tipo de intercambio que se analice, es decir, se aplica tanto a los intercambios económicos que se trabajan desde el método de precios implícitos homogéneos como a los intercambios energéticos que se analizan desde el método de precios implícitos no homogéneos. Solamente las variaciones en la demanda podrían introducir cambios en esta cuenta satélite porque estos tienen implicaciones en la estructura física del sistema. Estas serían restricciones físicas coherentes para el sistema bajo análisis porque mostrarán la disponibilidad de recursos físicos, tanto aquellos que provienen de la extracción doméstica como de la importación neta o de los inventarios existentes, disponibilidad que es independiente del tipo de análisis que se realice. En cambio, los ítems

Tabla 3.29. Oferta ajustada con PINH y cambio en f_2^1. MH (2014)

$\hat{x}_{kg}^{PE1}-\widehat{1'_{kg}Z^{P1}}$		1	2	3
kg	1	5,84	0,00	0,00
kg	2	0,00	10,66	0,00
kg	3	0,00	0,00	-6,50
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	2,34	1,58	6,50
kg	x_{kg}^{PE1}	8,18	12,24	0,00

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.30. Cuentas satélite con PINH y cambio en f_2^1. MH (2014)

$\tilde{S}_{kg}^{P1}$		1	2	3
kg	is_{kg}^{P1}	9,35	13,70	0,00
kg	e_{kg}^{P1}	3,51	3,04	6,50

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.31. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1, que cumple la condición de conservación. MH (2014)

	Z^{P1}	1	2	3	$Z^{P1}1_n$	f^{P1}	x^{P1}	$Z^{P1}1_n + f^{P1} - x^{P1}$
kg	1	0,0	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,0
kg	2	2,34	0,00	3,90	**6,24**	6,00	**12,24**	0,0
MJ	3	2,34	3,16	0,00	**5,50**	1,00	**6,50**	0,0
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	**2,34**	**1,58**	**6,50**				
kg	is_{kg}^{P1}	9,35	13,70	0,0				
kg	e_{kg}^{P1}	3,51	3,04	6,50				
kg	x_{kg}^{PE1}	**8,18**	**12,24**	**0,00**				
kg	$1'_{kg}Z^{P1} + is_{kg}^{P1} - e_{kg}^{P1} - x_{kg}^{PE1}$	0,00	0,00	0,00				

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.32. Intensidad ecológica con PINH y cambio en f_2^1, que cumple la condición de conservación. MH (2014)

$\tilde{D}_{MJ}^{S}$			1	2	3
MJ	(a)/(e)	$d_{1MJ}^{S}(is_{MJ}^{P})$	0	-1	1
MJ	(b)/(e)	$d_{2MJ}^{S}(e_{MJ}^{P})$	-1	-2	0
MJ	(a)	is_{MJ}^{P}	0	2	5
MJ	(b)	e_{MJ}^{P}	2	4	0
MJ	(c)	$1'_{MJ}Z^{P}$	2	2	0
MJ	(d)	x_{MJ}^{PE}	0	0	5
MJ	(e) = (a) - (b)	$is_{MJ}^{P} - e_{MJ}^{P} = x_{MJ}^{P} - 1'_{MJ}Z^{P}$	-2	-2	5

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura, 2) manufacturas y 3) energía.

de balanceo sí podrían sufrir modificaciones, porque serán distintos los residuos y/o las emisiones asociadas a los intercambios que tienen lugar en el sistema económico respecto de los residuos y emisiones que se derivan del proceso de transformación de las fuentes primarias de energía en fuentes secundarias.

Corregir este aspecto implica mantener la valoración de los insumos satélite entre los modelos y utilizar las cuentas de residuos y emisiones como ítems de balance. Presento la valoración de este mecanismo de balanceo después de mostrar las matrices de flujos físicos que corresponden a la aplicación del método con precios implícitos homogéneos. Una cuestión importante que hay que notar, por ahora, es que las matrices de flujos físicos para el modelo de precios implícitos no homogéneos no sufren alteraciones porque la cuenta satélite de insumos netos corresponde a la situación inicial.

En este apartado resta solamente analizar el caso de la matriz física que se deriva de la aplicación del método de precios implícitos cuando los precios son homogéneos. En este caso argumento que la estructura de la matriz física será distinta porque reflejará los intercambios económicos antes que los de carácter estrictamente físico. En otras palabras, esta matriz reproducirá el equivalente en unidades físicas de la estructura de la matriz insumo-producto en unidades monetarias. Este caso, sin embargo, Merciai y Heijungs (2014) no lo desarrollan para las condiciones iniciales del ejemplo propuesto, sino solamente para el caso de un cambio en la demanda final. En lo que sigue, presento ambos desarrollos, con el objeto de mostrar las características de esta modelación particular.

A fin de construir la matriz física desde los precios promedio de la oferta total del sistema, considero la oferta total en unidades monetarias $\mathbf{x}$ y en unidades físicas $\mathbf{x}^{P}$. Con esta información calculo el vector de precios promedio sectoriales $\bar{p}$ así:

$$\bar{\mathbf{p}}_{k\times 1} = [\bar{\mathbf{p}}_k] = \begin{cases} \frac{\mathbf{x}_k}{\mathbf{x}_k^{P}} \ \textbf{para}\ \mathbf{x}_k^{P} \neq \mathbf{0} \\ 0 \ \ \textbf{para}\ \mathbf{x}_k^{P} = \mathbf{0} \end{cases}$$

En la tabla 3.34 presento esta información y agrego una columna con las unidades correspondientes.

La matriz física que se deriva de esta estructura de precios implícitos homogéneos se muestra en la tabla 3.35.

Esta matriz se calcula a partir de:

$$\mathbf{Z}^{P}_{m\times n} = [\mathbf{z}^{P}_{kj}] = \begin{cases} \frac{\mathbf{z}_{kj}}{\bar{\mathbf{p}}_k} \ \textbf{si}\ \bar{\mathbf{p}}_k \neq \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \ \ \textbf{si}\ \bar{\mathbf{p}}_k = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$\mathbf{f}^{P}_{m\times 1} = [\ \mathbf{f}_k^{\ P}\ ] = \begin{cases} \frac{\mathbf{f}_k}{\bar{\mathbf{p}}_k} \ \textbf{si}\ \bar{\mathbf{p}}_k \neq \mathbf{0} \\ 0 \ \ \text{si}\ \bar{\mathbf{p}}_k = \mathbf{0} \end{cases}$$

Tabla 3.33. Matriz de flujos físicos con PINH y cambio en f_2^1 completa, que cumple la condición de conservación. MH (2014)

	Z^{P1}	1	2	3	$Z^{P1}1_n$	f^{P1}	x^{P1}	$Z^{P1}1_n + f^{P1} - x^{P1}$
kg	**1**	0,00	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,0
kg	**2**	2,34	0,00	3,90	**6,24**	6,00	**12,24**	0,0
MJ	**3**	2,34	3,16	0,00	**5,50**	1,00	**6,50**	0,0
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	**2,34**	**1,58**	**6,50**				
kg	is_{kg}^{P1}	9,35	13,70	0,0				
kg	e_{kg}^{P1}	3,51	3,04	6,50				
kg	x_{kg}^{P1}	**8,18**	**12,24**	**0,00**				
kg	$1'_{kg}Z^{P1} + is_{kg}^{P1} - e_{kg}^{P1} - x_{kg}^{PE1}$	0,00	0,00	0,00				
MJ	$1'_{MJ}Z^{P1}$	**2,34**	**3,16**	**0,00**				
MJ	is_{MJ}^{P1}	0,00	3,16	6,50				
MJ	e_{MJ}^{P1}	2,34	6,33	0,00				
MJ	x_{MJ}^{P1}	**0,00**	**0,00**	**6,50**				
MJ	$1'_{MJ}Z^{P1} + is_{MJ}^{P1} - e_{MJ}^{P1} - x_{MJ}^{PE1}$	0,00	0,00	0,00				

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.34. Oferta y PIH. MH (2014)

	x_k^p		x_k		$\bar{p}_k$	
1	kg	7,0	€	7,0	kg/€	1,000
2	kg	8,0	€	8,2	kg/€	1,025
3	MJ	5,0	€	7,5	MJ/€	1,500

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura, 2) manufacturas y 3) energía.

Tabla 3.35. Matriz de flujos físicos con PIH. MH (2014)

	Z^p	1	2	3	Z^p1_n	f^p	x^p	$Z^p1_n + f^p - x^p$
kg	**1**	0,00	1,00	2,00	**3,00**	4,00	**7,00**	0,00
kg	**2**	1,56	0,00	2,93	**4,49**	3,51	**8,00**	0,00
MJ	**3**	2,00	2,00	0,00	**4,00**	1,00	**5,00**	0,00
kg	$1'_{kg}Z^p$	**1,56**	**1,00**	**4,93**				
MJ	$1'_{kg}Z^p$	**2,00**	**2,00**	**0,00**				

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura, 2) manufacturas y 3) energía.

En este caso falta definir las condiciones del balance de materia (y de energía) que corresponden a esta estructura, que refleja la dimensión física de las transacciones económicas presentadas en la matriz insumo-producto monetaria. La matriz de cuentas satélites de esta estructura la calculo desde los lineamientos que he propuesto antes, es decir, mantengo los flujos iniciales de insumos satélite y ajusto los ítems de balance para verificar la condición de conservación en el sistema (tabla 3.36).

Cuando se produce un cambio en la demanda final, la estructura del sistema se modifica. Las variaciones en la matriz de flujos económicos las describí en la presentación de los resultados del modelo con precios no homogéneos. Aquí presento los cambios en la matriz de flujos físicos obtenidos desde precios implícitos homogéneos, que se asumen constantes a pesar de los cambios que se producen en el sistema (tabla 3.37).

Resta solamente definir las condiciones de balance del sistema. Propongo computar la nueva matriz de cuentas satélite $\tilde{\mathbf{S}}^{P}$, para ello, hay que estimar la matriz de coeficientes técnicos de los flujos ecológicos $\tilde{\mathbf{D}}^{S}$. En mi opinión, esta es la mejor opción de balanceo porque permite reflejar los cambios que sufren los flujos físicos en el sistema debido al cambio en la demanda final y, al mismo tiempo, se mantiene su naturaleza al ponderarlos igual que en la versión original del modelo de precios implícitos homogéneos.

La matriz de ponderaciones $\tilde{\mathbf{D}}^{S}$ se construye desde la información presentada antes del cambio en la demanda final (tabla 3.38). En la tabla 3.39 expongo la matriz de cuentas satélite $\tilde{\mathbf{S}}^{P1}=\tilde{\mathbf{D}}^{S}\,(\hat{\mathbf{x}}^{P1}-\widehat{\mathbf{1}'\mathbf{Z}^{P1}})$, que incorpora los cambios introducidos por la variación en la demanda final.[8]

Con estos elementos puedo presentar la matriz de flujos físicos que incorpora los cambios introducidos por el aumento en la demanda final (tabla 3.40).

De esta manera, para aplicar el método de precios implícitos bajo un esquema de precios homogéneos, también verifico que se cumpla el principio de conservación en el balance de materia que he construido.

He planteado una nueva forma de calcular e interpretar las condiciones de este balance, desde las propias características de los flujos físicos del modelo. De este modo, noto que en la práctica no existen inconsistencias termodinámicas en las matrices insumo-producto que se originan en matrices monetarias; en su lugar, la lectura de estos resultados y también la derivación de las condiciones de balance son incorrectas.

Por una parte, es preciso reconocer que las matrices físicas que corresponden a una estructura de precios no homogéneos permiten reflejar las transacciones económicas, pero desde las restricciones que se establecen en los intercambios propiamente físicos; mientras que las matrices físicas que corresponden a un esquema de precios homogéneos reflejan directamente la dimensión física de los intercambios económicos. Este matiz en la lectura es importante, como lo expliqué en detalle en la presentación de ambos enfoques en las secciones previas de este capítulo.

Por otra parte, he introducido dos propuestas para corregir la estimación de las condiciones del balance material (y/o energético). En suma, he demostrado que la incorrecta valoración de estas condiciones sí tiene implicaciones en la forma de un desbalance.

[8] Omito los subíndices porque todo se mide en kg.

Tabla 3.36. Matriz de flujos físicos con PIH completa. MH (2014)

	Z^P	1	2	3	$Z^P 1_n$	f^P	x^P	$Z^P 1_n + f^P - x^P$
kg	**1**	0,00	1,00	2,00	**3,00**	4,00	**7,00**	0,00
kg	**2**	1,56	0,00	2,93	**4,49**	3,51	**8,00**	0,00
MJ	**3**	2,00	2,00	0,00	**4,00**	1,00	**5,00**	0,00
kg	$1'_{kg}Z^P$	**1,56**	**1,00**	**4,93**				
kg	is^P_{kg}	8,00	9,00	0,00				
kg	e^P_{kg}	2,56	2,00	4,93				
kg	x^{PE}_{kg}	7,00	8,00	0,00				
kg		0,00	0,00	0,00	$1'_{kg}Z^P + is^P_{kg} - e^P_{kg} - x^{PE}_{kg}$			
MJ	$1'_{MJ}Z^P$	**2,00**	**2,00**	**0,00**				
MJ	is^P_{MJ}	0,00	2,00	5,00				
MJ	e^P_{MJ}	2,00	4,00	0,00				
MJ	x^P_{MJ}	0,00	0,00	5,00				
MJ		0,00	0,00	0,00	$1'_{MJ}Z^P + is^P_{MJ} - e^P_{MJ} - x^{PE}_{MJ}$			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.37. Matriz de flujos físicos con PIH y cambio en f_2^1. MH (2014)

	Z^{P1}	1	2	3	$Z^{P1} 1_n$	f^{P1}	x^{P1}	$Z^{P1} 1_n + f^{P1} - x^{P1}$
kg	**1**	0,00	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,00
kg	**2**	1,82	0,00	3,81	**5,63**	7,02	**12,65**	0,00
MJ	**3**	2,34	3,16	0,00	**5,50**	1,00	**6,50**	0,00
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	**1,82**	**1,58**	**6,41**				

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.38. Coeficientes técnicos de los flujos ecológicos con PIH y cambio en f_2^1. MH (2014)

$\tilde{D}^S$			1	2	3	$\tilde{D}^S$		1	2	3
kg	$is^P / (x^{PE} - 1'Z^P)$	$d_1{}^S(is^P)$	1,47	1,29	0,00		$d_1{}^S(is^P)$	1,47	1,29	0,00
kg	$e^P / (x^{PE} - 1'Z^P)$	$d_2{}^S(e^P)$	0,47	0,29	-1,00		$d_2{}^S(e^P)$	0,47	0,29	-1,00
kg		is^P	8,00	9,00	0,00	$d_1{}^S x(x^{P1} - 1'Z^{P1})$	is^{P1}	9,35	14,24	0,00
kg		e^P	2,56	2,00	4,93	$d_2{}^S x(x^{P1} - 1'Z^{P1})$	e^{P1}	2,99	3,16	6,41
kg		$1'Z^P$	1,56	1,00	4,93		$1'Z^{P1}$	1,82	1,58	6,41
kg		x^{PE}	7,00	8,00	0,00		x^{P1}	8,18	12,65	0,00
kg		$is^P - e^P$	5,44	7,00	-4,93		$is^{P1} - e^{P1}$	6,36	11,07	-6,41
kg		$x^P - 1'Z^P$	5,44	7,00	-4,93		$x^{P1} - 1'Z^{P1}$	6,36	11,07	-6,41

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.39. Cuentas satélite con PIH y cambio en f_2^1. MH (2014)

S_{kg}^{P1}		1	2	3
kg	is_{kg}^{P1}	9,35	14,24	0,00
kg	e_{kg}^{P1}	2,99	3,16	6,41

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Tabla 3.40. Matriz de flujos físicos con PIH y cambio en f_2^1, que cumple con la regla de conservación. MH (2014)

	Z^{P1}	1	2	3	$Z^{P1}1_n$	f^{P1}	x^{P1}	$Z^{P1}1_n + f^{P1} - x^{P1}$
kg	**1**	0,00	1,58	2,60	**4,18**	4,00	**8,18**	0,00
kg	**2**	1,82	0,00	3,81	**5,63**	7,02	**12,65**	0,00
MJ	**3**	2,34	3,16	0,00	**5,50**	1,00	**6,50**	0,00
kg	$1'_{kg}Z^{P1}$	**1,82**	**1,58**	**6,41**				
kg	is_{kg}^{P1}	9,35	14,24	0,00				
kg	e_{kg}^{P1}	2,99	3,16	6,41				
kg	x_{kg}^{PE1}	8,18	12,65	0,00				
kg		0,00	0,00	0,00	$1'_{kg}Z^{P1} + is^{P1} - e^{P1} - x^{PE1}$			

Nota: los encabezados numéricos de la matriz son 1) agricultura; 2) manufacturas, y 3) energía.

Comentarios finales

En este capítulo he explicado el modelo de precios implícitos para la estimación de matrices insumo-producto físicas. La principal ventaja que caracteriza a este método radica en que requiere un conjunto relativamente reducido de información. Esto ha favorecido el desarrollo de una serie de estudios en esta línea alrededor del mundo, sin embargo, todavía son escasos los desarrollos que se cuentan para economías sudamericanas. La desventaja principal es la notable incertidumbre respecto del sistema de precios implícitos que se requiere asumir para desarrollar el modelo. Este aspecto ha sido objeto de mucha preocupación en la literatura, en la cual se ha señalado la inconsistencia del método a la hora de garantizar el cumplimiento del principio termodinámico de conservación.

A fin de evaluar la debilidad del método, en este capítulo desarrollo resultados para el método aplicado desde precios homogéneos y no homogéneos. Esto sirve para entender las dificultades inherentes a cada uno de estos desarrollos. En conclusión, los resultados de ambas aplicaciones difieren sustancialmente, y, por lo tanto, también las condiciones de balance que caracterizan a cada una. La razón de esta diferencia descansa en que se trata de sistemas distintos: uno define el funcionamiento económico y otro

el funcionamiento de un sistema natural, en esta aplicación me centro en el caso del sistema energético. Por esta razón, los sistemas deben interpretarse desde una óptica distinta y podrán reflejar ítems de balance incomparables. Esto en definitiva implica que no existen razones para que existan inconsistencias termodinámicas en la aplicación del método de precios implícitos, también conocido como método de intensidad de los recursos. La inconsistencia fundamental se atribuye, en realidad, a la interpretación de los resultados que se obtienen.

Capítulo 4

Cuando la moneda es la energía: matrices insumo-producto físicas para la economía ecuatoriana, 2010-2016

En este capítulo presento los resultados de la aplicación de los métodos explicados en los capítulos previos para construir matrices insumo-producto en unidades físicas. El caso de la economía ecuatoriana se estudia durante el período 2010-2016 con cifras de los balances energéticos y de la matriz económica de utilización. Combino cifras energéticas y económicas de los intercambios intersectoriales que permiten derivar una lectura de la dimensión física, en este caso energética de la economía ecuatoriana. Comparo la evolución interanual de las matrices durante el periodo de estudio, pero también contrasto los resultados entre las distintas aplicaciones. Esta forma de análisis permite evidenciar los alcances y límites de cada método y, por lo tanto, identificar las mejores opciones para tomar de base esta información en aplicaciones posteriores de diverso tipo, por ejemplo, en análisis de redes ecológicas, en el cálculo de indicadores de emisión de GEI asociados a los intercambios intersectoriales o para descomposiciones de efectos estructurales.

Con este propósito, estructuré este capítulo en cuatro secciones. En la primera expongo los resultados de la aplicación del método de la energía primaria incorporada. La segunda sección la dedico al método de unidades híbridas, la cual separo en dos subsecciones: en la primera parte expongo los resultados desde un esquema de retornos energéticos constantes (RECE) y en la segunda parte identifico las diferencias respecto a un esquema con retornos decrecientes (REDE). Subdivido la tercera sección en dos partes: en la primera presento los resultados de la aplicación del método de precios implícitos no homogéneos, y la segunda la dedico al modelo con precios homogéneos. En la última sección expongo comentarios finales respecto del alcance de cada uno de estos métodos.

El método de la energía incorporada (MEI)

Empiezo por presentar los resultados de la construcción de la matriz de flujos energéticos intersectoriales $\mathbf{Z}^{PA}$, una matriz cuadrada de dimensión ($\mathbf{m + 1}$) en donde $\mathbf{m = 12}$ son los sectores energéticos a los que se añade el sector de consumo no energético de energía.

Los sectores energéticos que considero son los siguientes: 1) petróleo, 2) gas natural, 3) caña de azúcar, 4) leña, 5) hidroenergía, 6) electricidad, 7) gas licuado de petróleo y otros gases, 8) gasolinas y alcoholes, 9) kerosene y *jet fuel*, 10) diésel, 11) *fuel oil* y 12) otras fuentes secundarias. En los capítulos previos presenté la información agregada de estas categorías. Las fuentes renovables incluían caña de azúcar, leña e hidroenergía; las fuentes no renovables son gas natural y petróleo crudo, y los derivados de petróleo son gas licuado de petróleo y otros gases, gasolinas y alcoholes, kerosene y *jet fuel,* diésel, *fuel oil* y otras fuentes secundarias.

En el gráfico 4.1 presento los flujos intersectoriales que corresponden a la matriz $\mathbf{Z}^{PA}$ para el período 2010-2016. En el eje horizontal constan las interrelaciones entre los sectores proveedores y los consumidores de energía. Así, por ejemplo, la etiqueta 1-11 muestra la cantidad de energía que le provee el sector 1) petróleo al sector 11) *fuel oil*. Aunque no es muy grande la diferencia entre 2010 y 2016, los colores de los marcadores permiten analizar estos cambios. He organizado la información de tal manera que solamente incluyo las relaciones que contienen datos no nulos. Por ejemplo, el gas natural (sector 2) no se utiliza para producir diésel (sector 10), entonces la relación 2-10 se omite.

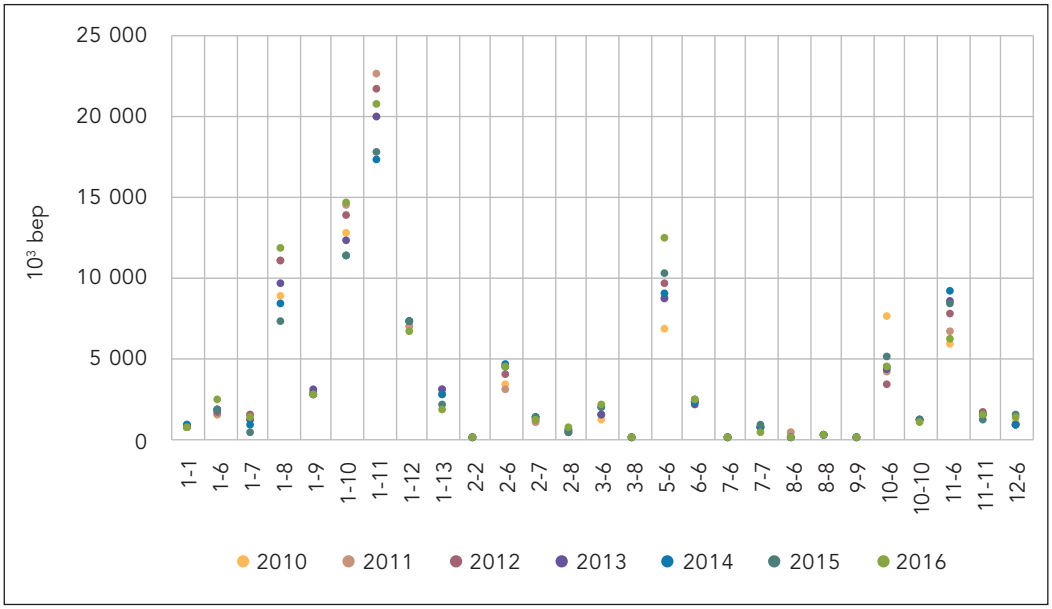
Al menos puedo notar tres rasgos en esta estructura:

1. La mayoría de los flujos de intercambios energéticos no varían mucho con el transcurso de los años.
2. El petróleo (sector 1) constituye la principal fuente de energía del sistema ecuatoriano de transformación energética durante el periodo de análisis tanto en cantidad como en frecuencia.
3. Los derivados de petróleo (sectores 7 a 12) y la electricidad (sector 6) son los mayores consumidores de energía.

En esta información se describe el consumo intermedio, por lo que al sumar la demanda final se obtendrá la oferta total de energía. Se puede ver que durante el periodo de estudio, la demanda final es algo superior al 50 % de la oferta total y el consumo intermedio más los ajustes estadísticos constituye la parte remanente, que es en promedio un 48 % de la oferta total. El consumo final muestra un crecimiento sostenido hasta 2014 y, desde entonces, decae un 4 % cada año. Se concentra principalmente en tres rubros: diésel, gasolinas más alcoholes y electricidad. La oferta total se incrementa desde 166 hasta 187 Mbep entre 2010 y 2016. En términos acumulados el consumo final crece más (15 %) que la oferta total (13 %) durante el periodo analizado. La composición del consumo final por tipos de fuentes y de la oferta total por la participación del consumo intermedio y del consumo final de energía se pueden analizar en el gráfico 4.2.

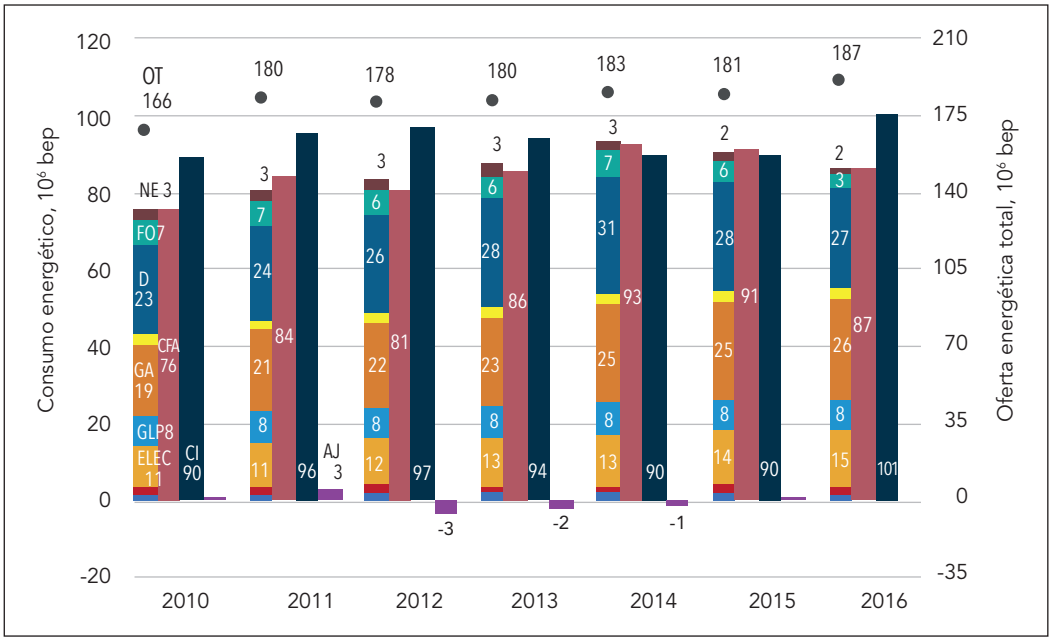
La oferta total de energía también puede definirse desde los insumos del sistema. En efecto, la suma del consumo de energía asociado al proceso de transformación, más los insumos del sistema, más los residuos y menos las emisiones determina la oferta total

Gráfico 4.1. Flujos de intercambio energético. MEI



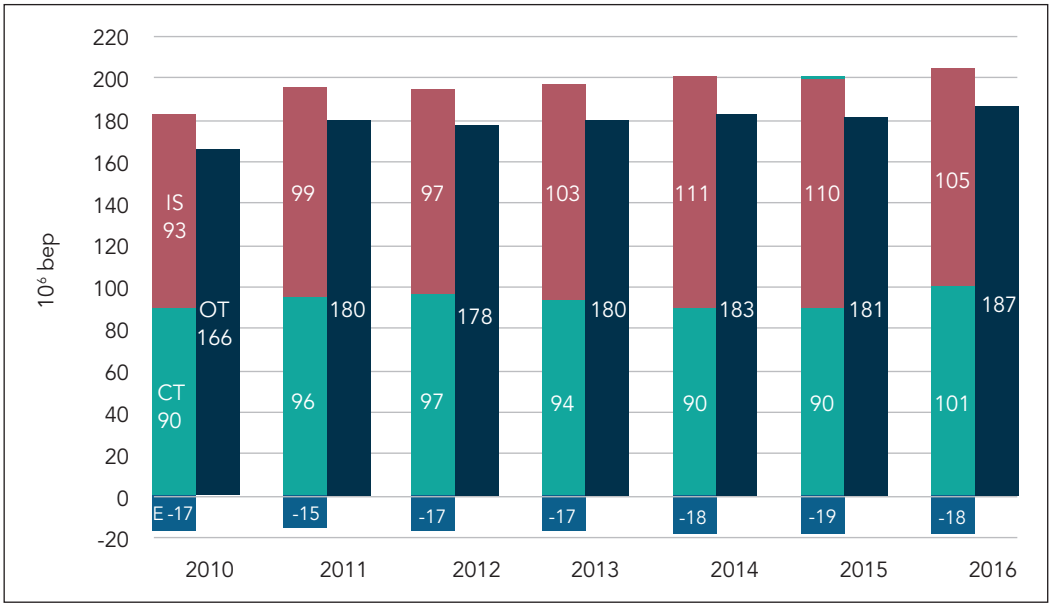
Nota: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado de petróleo y otros gases; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*; (12) otras fuentes secundarias, y (13) no energéticos.

Gráfico 4.2. Composición del consumo final y oferta total de energía. MEI



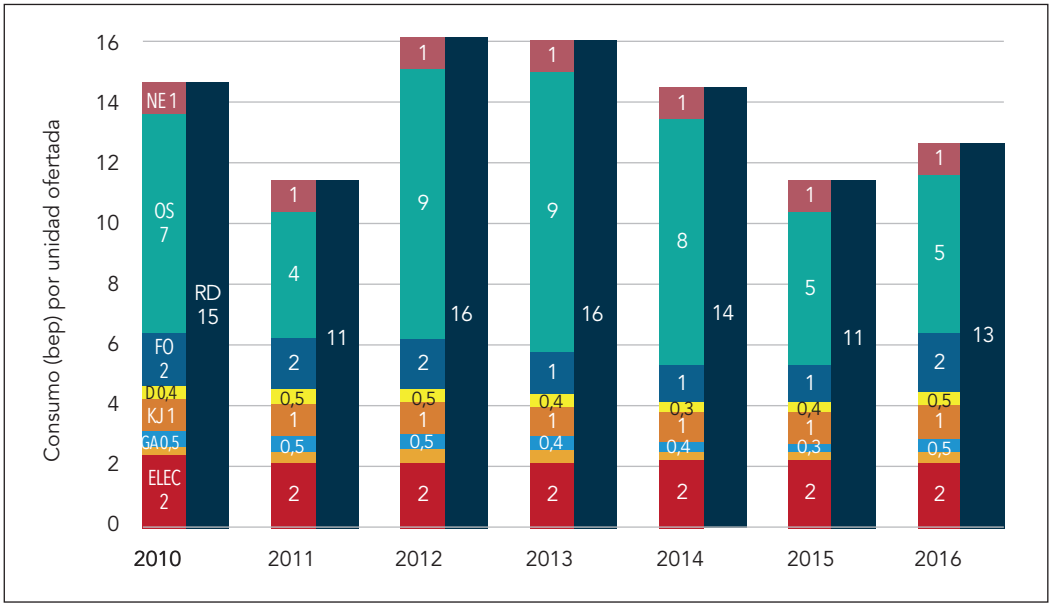
Nota: (ELEC) electricidad; (GLP) gas licuado y otros gases; (GA) gasolinas y alcoholes; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (NE) no energéticos; (CFA) consumo final + ajustes; (CI) consumo intermedio, (AJ) ajustes estadísticos, y (OT) oferta total.

Gráfico 4.3. Composición de la oferta total de energía. MEI



Nota: (E) emisiones; (CT) consumo de la transformación; (IS) insumos satélite, y (OT) oferta total.

Gráfico 4.4. Requerimientos directos de energía. MEI



Nota: (ELEC) electricidad; (GA) gasolinas y alcoholes; (KJ) kerosene y *jet fuel*; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (OS) otras fuentes secundarias; (NE) no energéticos, y (RD) requerimientos directos.

de energía. En el gráfico 4.3 se puede ver que el sistema no genera residuos durante el periodo de análisis, sin embargo, una parte de los procesos de transformación debe descontarse como emisiones, las cuales fluctúan entre 15 y 19 millones de bep. Los insumos satélite del sistema, que comprenden la extracción de energía primaria, las importaciones netas y los inventarios disponibles de recursos, pasan de 93 a 105 Mbep entre 2010 y 2016.

Ahora, puedo determinar la cantidad de insumos energéticos que se requieren de manera directa para generar cada unidad de la oferta del sistema mediante la matriz $\mathbf{A}^{PA} = \mathbf{Z}^{PA}(\hat{\mathbf{x}}^{PA})^{-1}$.

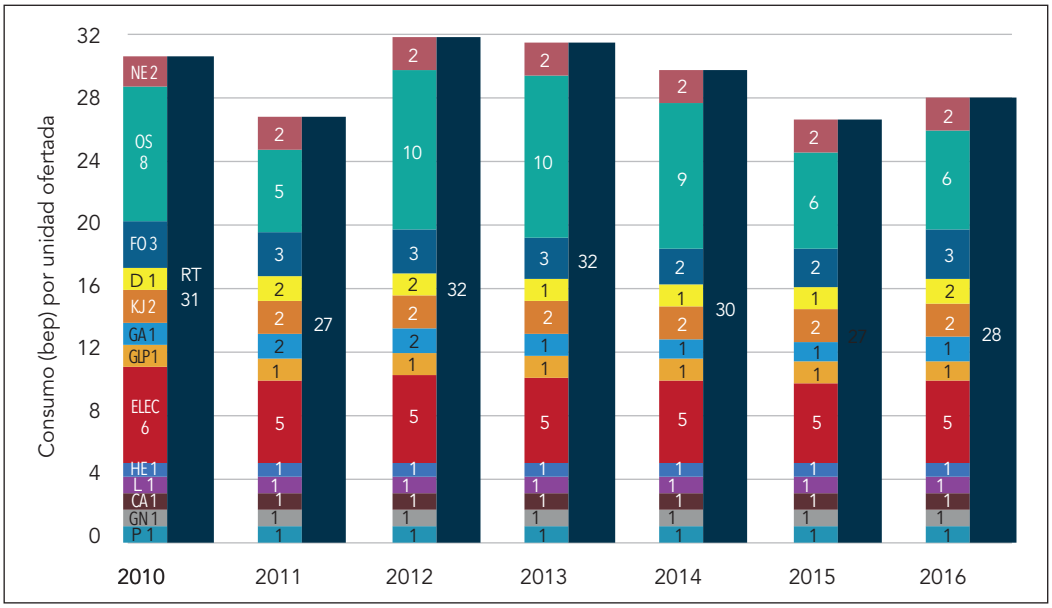
Comparo los resultados interanuales a través del gráfico 4.4. Se interpreta que por cada unidad de energía disponible para la oferta de los distintos productos energéticos se necesitaron de forma directa entre 11 y 16 unidades de energía entre 2010 y 2016, los sectores de mayor consumo son otras fuentes secundarias de energía, que comprenden la producción de derivados de petróleo. En 2012, los requerimientos directos de energía alcanzaron los valores más altos y, en 2011, los más bajos del periodo analizado.

Los requerimientos totales se miden a través de la siguiente matriz equivalente a la inversa de Leontief en términos físicos: $\mathbf{L}^{PA} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^{PA})^{-1}$, cuyos resultados interanuales presento en el gráfico 4.5. Mientras en 2010 se necesitaban aproximadamente 31 unidades de energía por cada unidad disponible para la oferta de los diversos tipos, en 2016, esta cifra disminuyó a 28 unidades de energía. Cada año se requiere el doble de energía total, tanto directa como indirecta, con relación a los requerimientos directos del sistema, y los sectores más demandantes son otras fuentes secundarias de energía, la electricidad y el *fuel oil*.

Por último, Gutiérrez et al. (2018) proponen calcular los requerimientos de energía primaria ligados al consumo final de energía a partir de la matriz de transformación que constituye un extracto de la matriz de requerimientos totales de energía que acabo de presentar. La matriz de transformación solamente toma en cuenta la energía primaria que se consume por cada unidad de energía disponible para la oferta, y únicamente en los sectores de consumo secundarios. Por lo tanto, se trata de un cálculo de la energía primaria incorporada directa e indirectamente en los procesos de transformación necesarios para generar energía secundaria. Los resultados de esta matriz los presento en el gráfico 4.6.

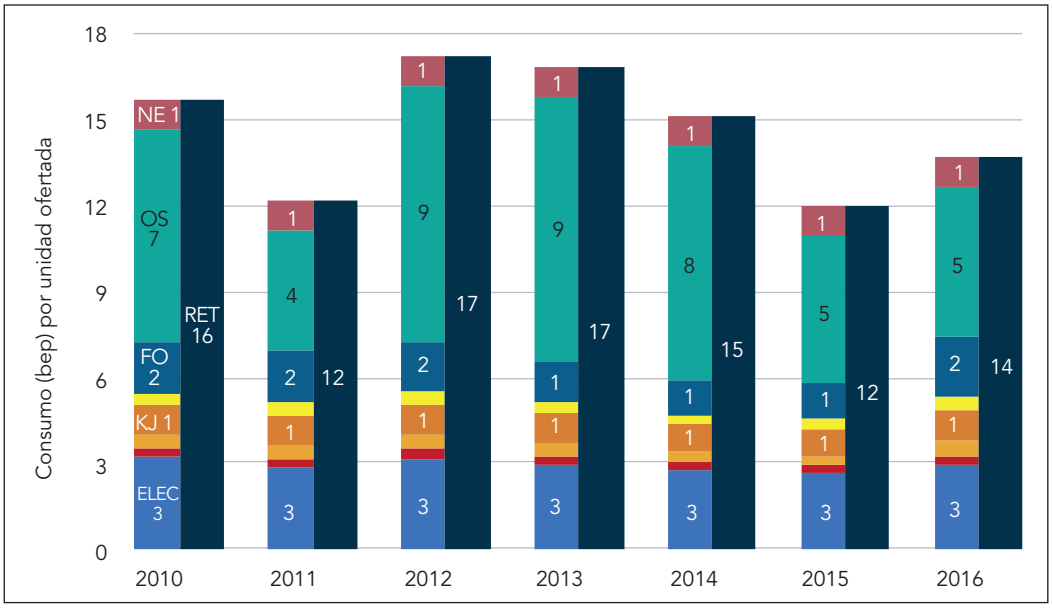
Durante el periodo de análisis se consumieron entre 12 y 17 unidades de energía primaria por cada unidad disponible para la oferta total de energía. Esto significa que alrededor de la mitad de los recursos energéticos que emplea el sistema son de origen primario. Específicamente, se identifica que en 2010 se necesitaron 3,25 unidades de energía primaria para ofertar una unidad de electricidad, y esta cifra se mantuvo más o menos estable durante el periodo de análisis y terminó en tres unidades de fuentes primarias. Cada unidad de energías secundarias que se ofertó en 2016 requirió una inversión de al menos cinco unidades de energía primaria. Por último, calculo que una unidad de cada uno de los productos energéticos disponibles para la oferta requirió de

Gráfico 4.5. Requerimientos totales de energía. MEI



Nota: (P) petróleo; (GN) gas natural; (CA) caña de azúcar; (L) leña; (HE) hidroenergía; (ELEC) electricidad; (GLP) gas licuado y otros; (GA) gasolinas y alcoholes; (KJ) kerosene y *jet fuel*; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (OS) otras fuentes secundarias; (NE) no energéticos, y (RT) requerimientos totales.

Gráfico 4.6. Requerimientos energéticos de la transformación. MEI



Nota: (ELEC) electricidad; (KJ) kerosene y *jet fuel*; (FO) *fuel oil*; (OS) otras fuentes secundarias; (NE) no energéticos, y (RET) requerimientos energéticos de la transformación.

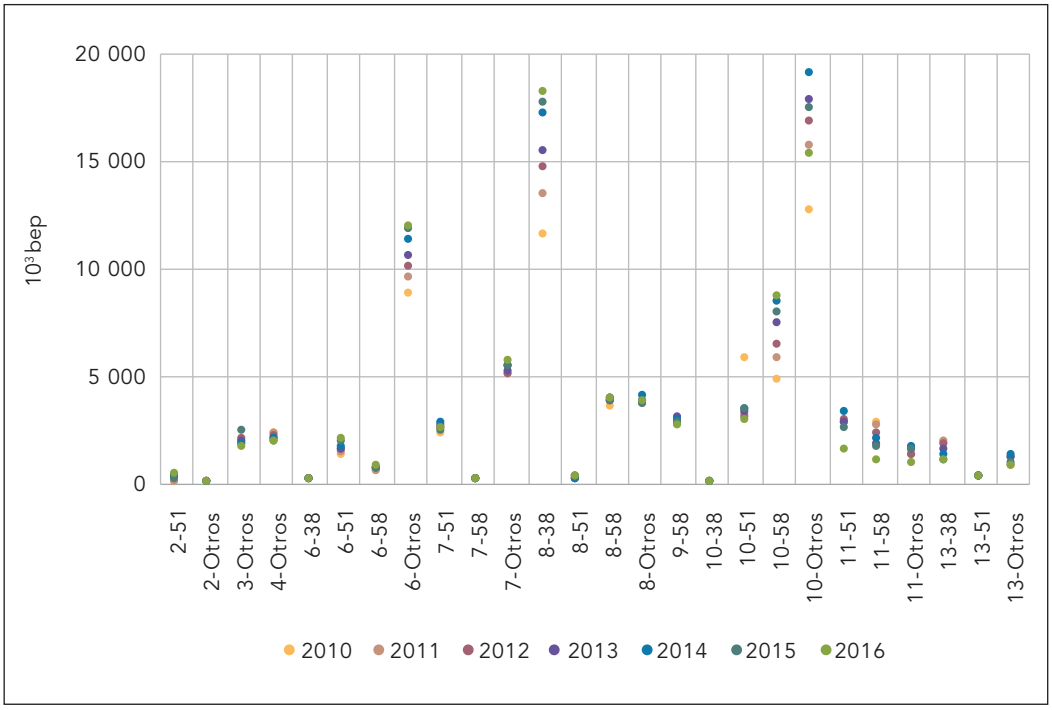
casi 14 unidades de fuentes primarias. Si se interpreta este factor como una medida de la eficiencia energética del sistema, puesto que compara la inversión energética con la producción factible, se puede decir que el sistema energético ecuatoriano se torna más eficiente al contrastar las cifras de 2010 y 2016, porque en este último año se consume casi un 13 % menos recursos primarios para producir cada unidad que se oferta en el sistema.

Por último, la distribución del consumo interindustrial de energía se mide a partir de $\mathbf{E}^{p} = \hat{\mathbf{f}}^{PA}\mathbf{B}$. Esta formulación muestra datos de consumo para $(\mathbf{m} + \mathbf{1}) \times \mathbf{n}$ sectores. En este caso, cada año se estima el consumo interindustrial para $\mathbf{13} \times \mathbf{71}$ sectores. En el anexo 1, codificación A, se detallan estas actividades. En el gráfico 4.7 resumo la información anual para las relaciones no nulas de consumo interindustrial, y en el caso de los sectores económicos solo reporto cuatro sectores de mayor consumo energético. Resulta que las gasolinas y alcoholes son los productos de mayor consumo para fabricar productos refinados de petróleo. El diésel y la electricidad son las dos fuentes energéticas de mayor consumo entre los demás sectores económicos. Finalmente, el diésel también constituye la principal fuente de energía para el sector de transporte y almacenamiento.

La ventaja de esta estimación es que la información está muy desagregada por sectores económicos de consumo. El vector resultante detalla cifras de consumo energético para 71 sectores económicos, que puede asociarse a las emisiones de GEI o servir de base para desarrollar modelos de redes ecológicas u otras aplicaciones. La desventaja es que refleja el consumo final de energía en unidades físicas distribuido conforme la estructura de los flujos económicos del intercambio. En ese contexto, no muestra la naturaleza energética de los intercambios sectoriales asociados a los procesos de transformación. Esa lectura debería realizarse desde el método de unidades híbridas cuyos resultados presento en la siguiente sección.

Existen ciertas similitudes entre la estructura de las transacciones económicas interindustriales que medí a partir de la matriz $\mathbf{Z}^{A}$ y los flujos energéticos de consumo interindustrial definidos en la matriz $\mathbf{E}^{p}$. Sin embargo, también existen aspectos que diferencian estas estructuras, entre otras razones, porque algunas relaciones intersectoriales del sistema económico no se hallan presentes en los flujos energéticos. Este es el caso del petróleo, la hidroenergía y otras fuentes secundarias como insumos energéticos del sistema. En el gráfico 4.8 presento información por cuartiles construidos con base en la ordenación de la información correspondiente a las cifras en dólares del año 2016. Se pueden comparar ambas estructuras de intercambio, la económica y la energética.

Gráfico 4.7. Consumo interindustrial de energía por principales consumidores. MEI



Nota: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado y otros; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*; (12) otras secundarias, y (13) no energéticos. Sectores económicos: (38) fabricación de productos refinados de petróleo y de otros; (51) generación, captación y distribución de energía eléctrica, y (58) transporte y almacenamiento. Los demás sectores se agregan en la categoría Otros.

Gráfico 4.8. Intercambios intersectoriales económicos y energéticos. MEI

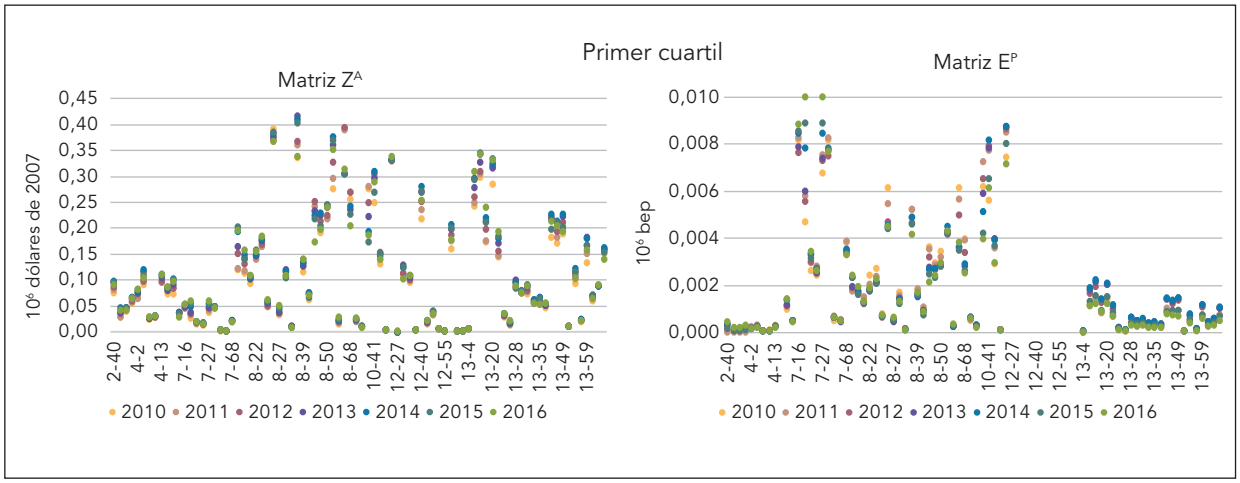
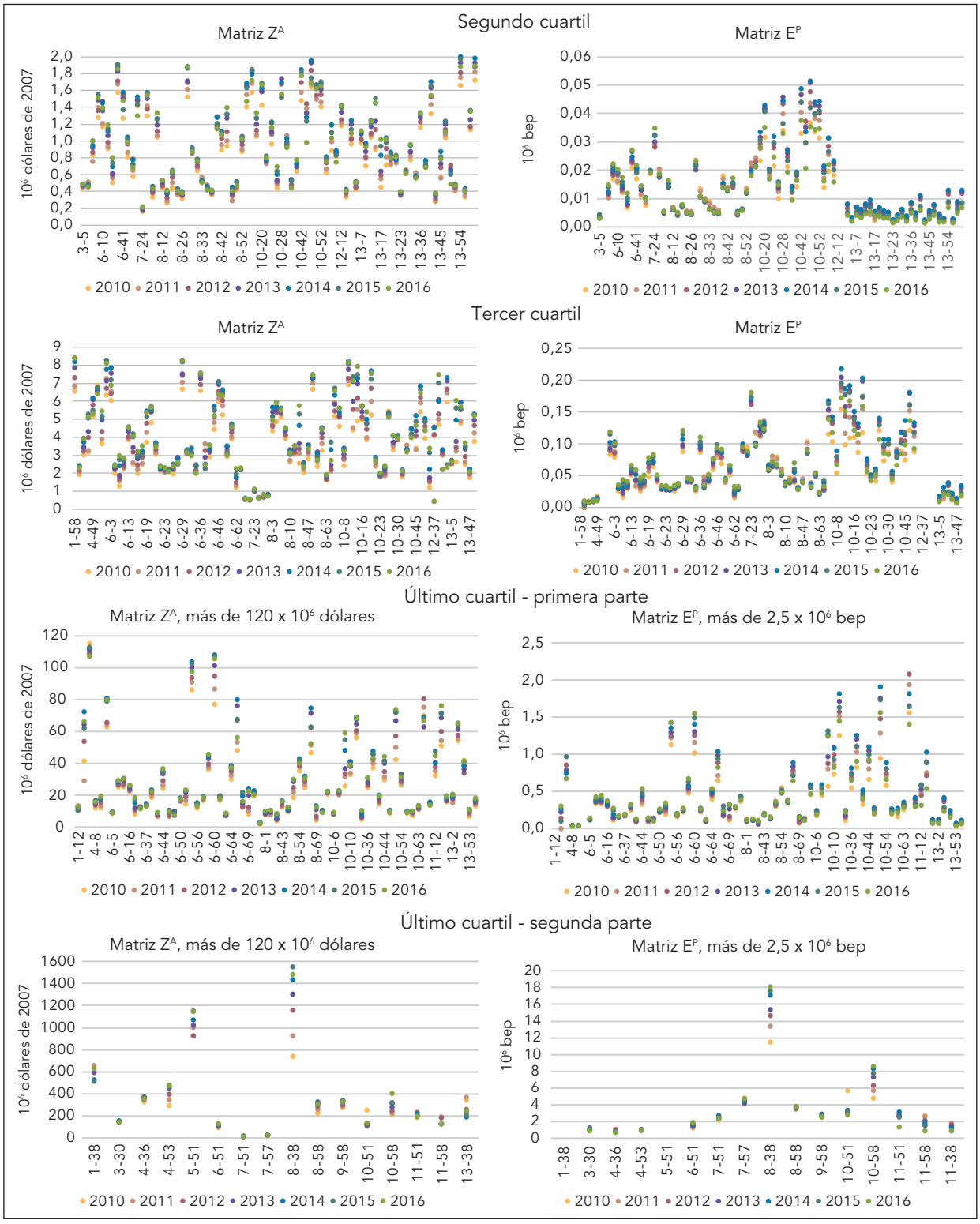


Gráfico 4.8. (*continuación*)



Nota: en el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan en el eje horizontal.

El método de unidades híbridas (MUH)

En esta sección reviso los resultados de la aplicación del método de unidades híbridas para el período 2010-2016 en el caso de la economía ecuatoriana. Detallo información para **m = 12** sectores energéticos: 1) petróleo, 2) gas natural, 3) caña de azúcar, 4) leña, 5) hidroenergía, 6) electricidad, 7) gas licuado de petróleo y otros gases, 8) gasolinas y alcoholes, 9) kerosene y *jet fuel*, 10) diésel, 11) *fuel oil* y 12) otras fuentes secundarias, y para **s = 5** sectores económicos, no energéticos. Estos son 13) agro, pesca y minería, 14) industria, 15) construcción, 16) comercial, servicios, sector público y 17) transporte y almacenamiento. En total, los datos corresponden a **n = m + s = 17** sectores.

Retornos energéticos constantes de escala (RECE)

La matriz insumo-producto monetaria **Z** de este modelo, cuya dimensión es **n x n**, está distribuida por cuartiles y relaciones intersectoriales que detallo en el gráfico 4.9

Además de las transacciones intersectoriales, la matriz monetaria se completa a partir de la demanda final. En este caso, la mayor parte de la oferta se consume a través de la demanda final de la industria y del comercio, los servicios y el sector público (gráfico 4.10). Los requerimientos del consumo intermedio, descritos por cuartiles, constituyen una menor proporción de la oferta total. Más adelante, en el gráfico 4.11, se puede ver que esta estructura es inversa a la que caracteriza a los flujos energéticos porque en ese caso predominan los intercambios asociados al proceso de transformación.

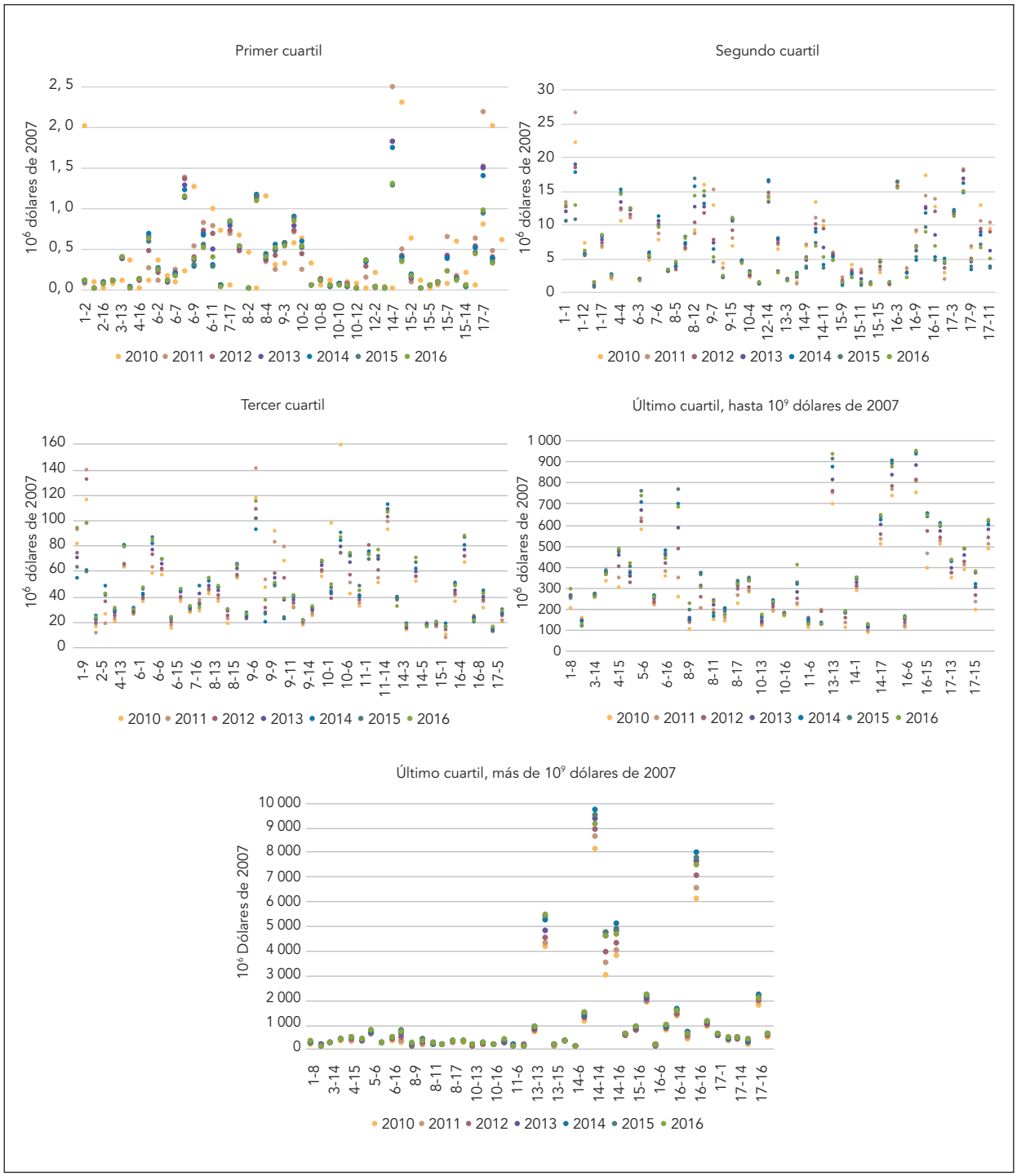
A diferencia de la matriz de flujos energéticos empleada en el caso del modelo de energía incorporada que presenté en la sección previa, en este caso identifico el consumo de energía y los intercambios intersectoriales también para los sectores económicos. La oferta total de energía abastece principalmente el consumo intermedio, condición que se explica porque los intercambios describen el proceso de transformación de la energía.

En cuanto a los flujos de consumo final, se trata de una estructura distinta a la que caracteriza a los intercambios monetarios porque predomina el consumo final de los sectores energéticos, en particular energía eléctrica y gas licuado, antes que el consumo final de los sectores económicos (gráfico 4.12).

En el gráfico 4.13 describo las condiciones de balance desde el enfoque de los insumos netos del sistema, que en este modelo incluye a los sectores económicos. Estos resultados, a diferencia del modelo de energía incorporada que presento en la primera parte de este capítulo, muestran tanto el consumo energético de la transformación como el consumo energético que realizan los sectores económicos.

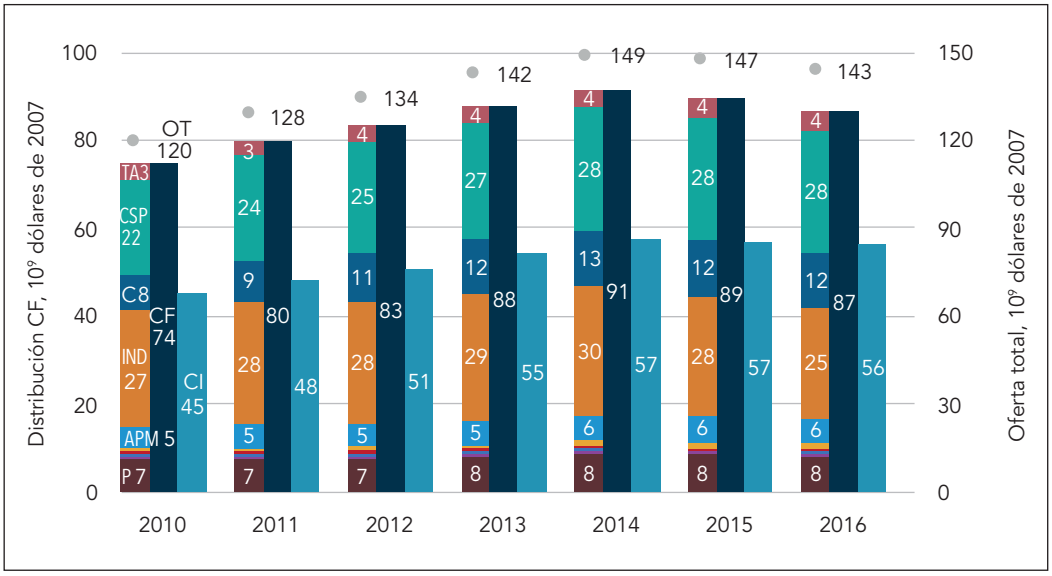
En este modelo se observa que además de la energía disponible para los procesos de transformación, los sectores económicos requieren entre 63 y 79 millones de bep de energía adicional para su funcionamiento. Tal como en el modelo previo, los insumos energéticos constituyen la parte más importante de la oferta energética, es decir, entre 56 % y 61 % de la oferta disponible para la transformación. No se registran residuos del proceso de transformación, y las emisiones se mantienen entre el 8 % y 11 % de la oferta energética de la transformación.

Gráfico 4.9. Transacciones económicas intersectoriales. MUH



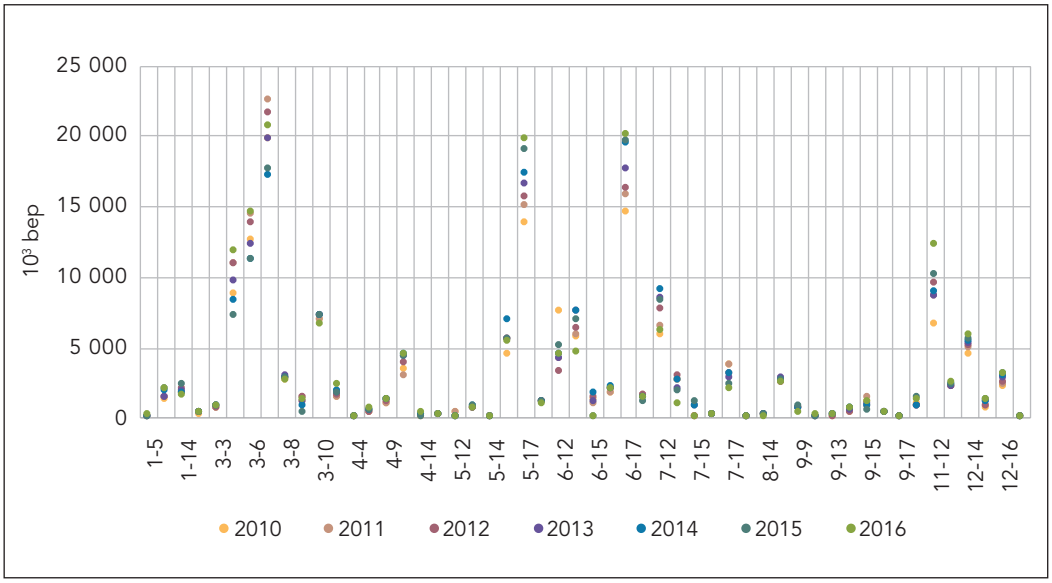
Nota: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña, (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado de petróleo y otros gases; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*, y (12) otras fuentes secundarias. Sectores no energéticos: (13) agro, pesca y minería; (14) industria; (15) construcción; (16) comercial, servicios, sector público, y (17) transporte y almacenamiento.

Gráfico 4.10. Oferta y demanda económica asociada a los intercambios energéticos. MUH



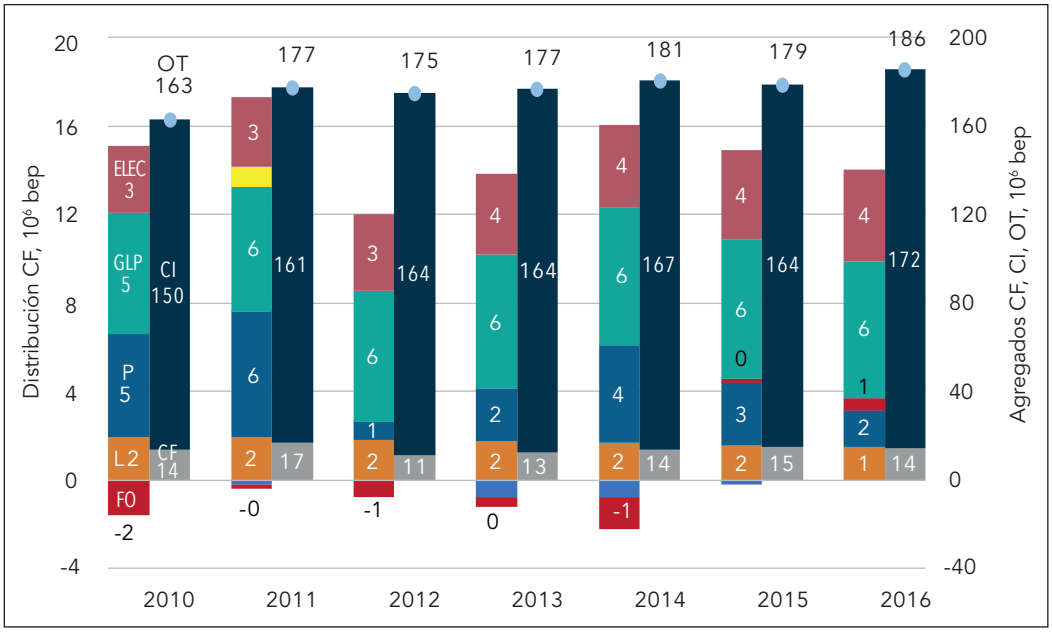
Nota: (P) petróleo; (APM) agro, pesca y minería; (IND) industria; (C) construcción; (CSP) comercio, servicios y sector público; (TA) transporte y almacenamiento; (CF) consumo final; (CI) consumo intermedio, y (OT) oferta total.

Gráfico 4.11. Flujos energéticos intersectoriales. MUH



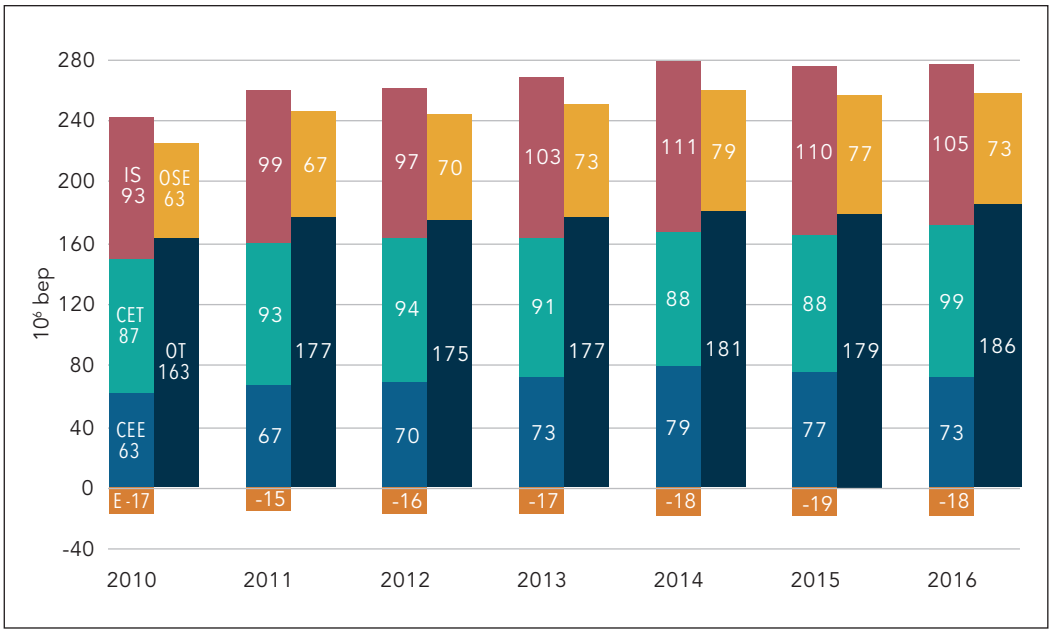
Nota: sectores energéticos: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado de petróleo y otros gases; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*, y (12) otras fuentes secundarias. Sectores no energéticos: (13) agro, pesca y minería; (14) industria; (15) construcción; (16) comercial, servicios, sector público, y (17) transporte y almacenamiento.

Gráfico 4.12. Oferta y demanda energética. MUH



Nota: (FO) *fuel oil*; (L) leña; (P) petróleo; (GLP) gas licuado y otros gases; (ELEC) electricidad; (CF) consumo final; (CI) consumo intermedio, y (OT) oferta total.

Gráfico 4.13. Condiciones de balance-insumos netos del sistema. MUH



Nota: (E) emisiones; (CEE) consumo energético de los sectores económicos; (CET) consumo energético de la transformación; (IS) insumos satélite; (OT) oferta total, y (OSE) oferta energética disponible para los sectores económicos.

Este modelo permite cuantificar los requerimientos energéticos del sistema. Los requerimientos totales se determinan a partir de la matriz de coeficientes α^H, mientras que la matriz de coeficientes δ^H evidencia los requerimientos directos del sistema. Aunque una versión básica del modelo se construye a partir del supuesto de retornos energéticos constantes de escala (RECE), es decir, sin pérdidas de eficiencia en el sistema, la lectura de los requerimientos energéticos totales permite analizar pérdidas en el proceso de transformación cuando se invierte más energía primaria que la energía secundaria que se produce.

Asimismo, en determinados casos también se ubican rendimientos energéticos, es decir, una producción de energía mayor a la inversión inicial. Esta condición tiene lugar porque la producción de energía secundaria supera la inversión de energía primaria. En la tabla 4.1 analizo estos patrones para el periodo 2010-2016 al contrastar la diferencia entre inversión en energía primaria y la producción de energía secundaria para cada tipo de fuente de energía ($\alpha_j^{Ha} - \alpha_j^{Hb}$). Tanto la inversión primaria $\alpha_j^{Ha} = \sum_{k=1}^{a} \alpha_{kj}^{H}$ (donde **a** corresponde a las fuentes energéticas primarias) como la producción secundaria $\alpha_j^{Hb} = \sum_{k=1}^{b} \alpha_{kj}^{H}$ (donde **b** corresponde a las fuentes energéticas secundarias) se miden por la suma de los coeficientes de requerimientos totales para dichas fuentes.

Los valores negativos muestran rendimientos energéticos porque la inversión total, tanto directa como indirecta, en fuentes primarias es inferior a la producción de energía secundaria. Esto sucede en el caso de las gasolinas y alcoholes, diésel, gas licuado y otros, y en la mayor parte del periodo para kerosene y *jet fuel*. Esto significa que existe un remanente energético definido por la diferencia entre la energía primaria que se emplea directa e indirectamente en estas fuentes y el producto energético secundario que se obtiene. En otras palabras, el uso de energía primaria en estas fuentes es eficiente desde la perspectiva de la conversión energética.

Sucede lo contrario con el caso del *fuel oil*, otras energías secundarias, electricidad y en algunos años con el kerosene y *jet fuel*. Estos energéticos muestran pérdidas directas e indirectas en la conversión que se evidencian porque cada unidad de energía que se produce requiere de una inversión energética primaria más alta y, en la tabla anterior, lo identifico con los valores positivos. El caso más evidente es el de otras fuentes secundarias que requieren en total entre 4 y 8 unidades de energía primaria adicionales para producir la energía secundaria necesaria para disponer de cada unidad de la oferta energética. En todos los casos, sin embargo, no se constata una tendencia muy clara hacia mejorar o empeorar la eficiencia, hay altibajos en todos los productos energéticos durante el periodo de análisis.

Una lectura similar, solamente de los requerimientos directos de energía, a partir de la matriz δ^H, muestra que de manera general (salvo por el caso específico de la electricidad en 2010) existen pérdidas en la conversión en todos los energéticos. Es decir, se invierten de forma directa más recursos energéticos de los que se producen. Presento la diferencia entre el total de requerimientos energéticos directos de las fuentes primarias y el total de requerimientos energéticos directos de las fuentes secundarias en la tabla 4.2. Los valores positivos evidencian pérdidas energéticas directas y los negativos rendimientos energéticos directos. Asimismo, otras fuentes secundarias muestran las pérdidas más severas en la conversión energética porque se requieren entre cuatro y nueve unidades de energía primaria adicional para producir la energía secundaria que demanda el sistema para disponer de cada unidad de oferta energética.

Tabla 4.1. Rendimiento (pérdida) energético (a) total en la transformación. MUH con RECE

Energético	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Electricidad	0,45	0,44	0,85	0,56	0,35	0,33	0,87
Gas licuado y otros	-0,82	-0,79	-0,76	-0,78	-0,84	-0,90	-0,76
Gasolinas/alcoholes	-0,54	-0,49	-0,50	-0,58	-0,66	-0,71	-0,53
Kerosene/*jet fuel*	-0,02	0,00	0,02	-0,02	-0,09	-0,05	0,02
Diésel	-0,63	-0,54	-0,57	-0,66	-0,72	-0,71	-0,57
Fuel oil	0,68	0,60	0,51	0,29	0,06	0,13	0,91
Otras fuentes secundarias	6,19	3,15	7,81	7,98	6,84	3,86	4,11

Nota: inversión < producción = rendimiento energético. Inversión > producción = pérdida energética ($\alpha_j^{Ha} - \alpha_j^{Hb}$).

Tabla 4.2. Rendimiento (pérdida) energético (a) directo en la transformación. MUH con RECE

Energético	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Electricidad	-0,33	0,02	0,17	0,03	0,02	0,06	0,40
Gas licuado y otros	0,17	0,20	0,22	0,20	0,15	0,09	0,23
Gasolinas/alcoholes	0,47	0,51	0,50	0,43	0,35	0,30	0,48
Kerosene/*jet fuel*	0,99	1,00	1,02	0,99	0,94	0,99	1,03
Diésel	0,36	0,45	0,42	0,34	0,28	0,29	0,42
Fuel oil	1,50	1,44	1,36	1,20	1,00	1,09	1,69
Otras fuentes secundarias	7,28	4,18	8,91	9,16	8,10	5,03	5,19

Nota: inversión < producción = rendimiento energético. Inversión > producción = pérdida energética ($\delta_j^{Ha} - \delta_j^{Hb}$).

Tabla 4.3. Rendimiento (pérdida) energético (a) total en la transformación. MUH con REDE

Energético	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Electricidad	1,46	1,17	2,20	1,47	0,95	0,86	2,11
Gas licuado y otros	-0,85	-0,81	-0,79	-0,80	-0,86	-0,81	-0,81
Gasolinas/alcoholes	-0,55	-0,50	-0,52	-0,59	-0,68	-0,73	-0,54
Kerosene/*jet fuel*	-0,01	0,01	0,03	-0,02	-0,09	-0,05	0,02
Diésel	-0,65	-0,55	-0,59	-0,68	-0,74	-0,74	-0,59
Fuel oil	0,71	0,62	0,54	0,31	0,07	0,14	0,95
Otras fuentes secundarias	6,41	3,23	8,17	8,28	7,03	4,03	4,27

Nota: inversión < producción = rendimiento energético. Inversión > producción = pérdida energética ($\alpha_j^{Ha} - \alpha_j^{Hb}$).

Ahora, para contrastar esta misma información en unidades energéticas, esta vez empleo las matrices $\alpha^{H}\hat{x}^{*}$ y $\delta^{H}\hat{x}^{*}$. En la siguiente sección represento gráficamente los requerimientos energéticos totales medidos en términos absolutos, es decir, los requerimientos directos e indirectos de energía medidos en unidades energéticas. Contrasto los resultados del modelo con RECE con el de REDE. En general, la composición de estos flujos en el transcurso del periodo de análisis no cambia sustancialmente; no obstante, existe un incremento en los requerimientos energéticos, entre 2010 y 2016, que va desde 534 a 598 millones de bep. Los principales consumidores de energía son el transporte, la industria, la electricidad y el petróleo. Sin embargo, también son importantes consumidores de energía los sectores de comercio, servicios y sector público, así como también los productores de diésel y *fuel oil*.

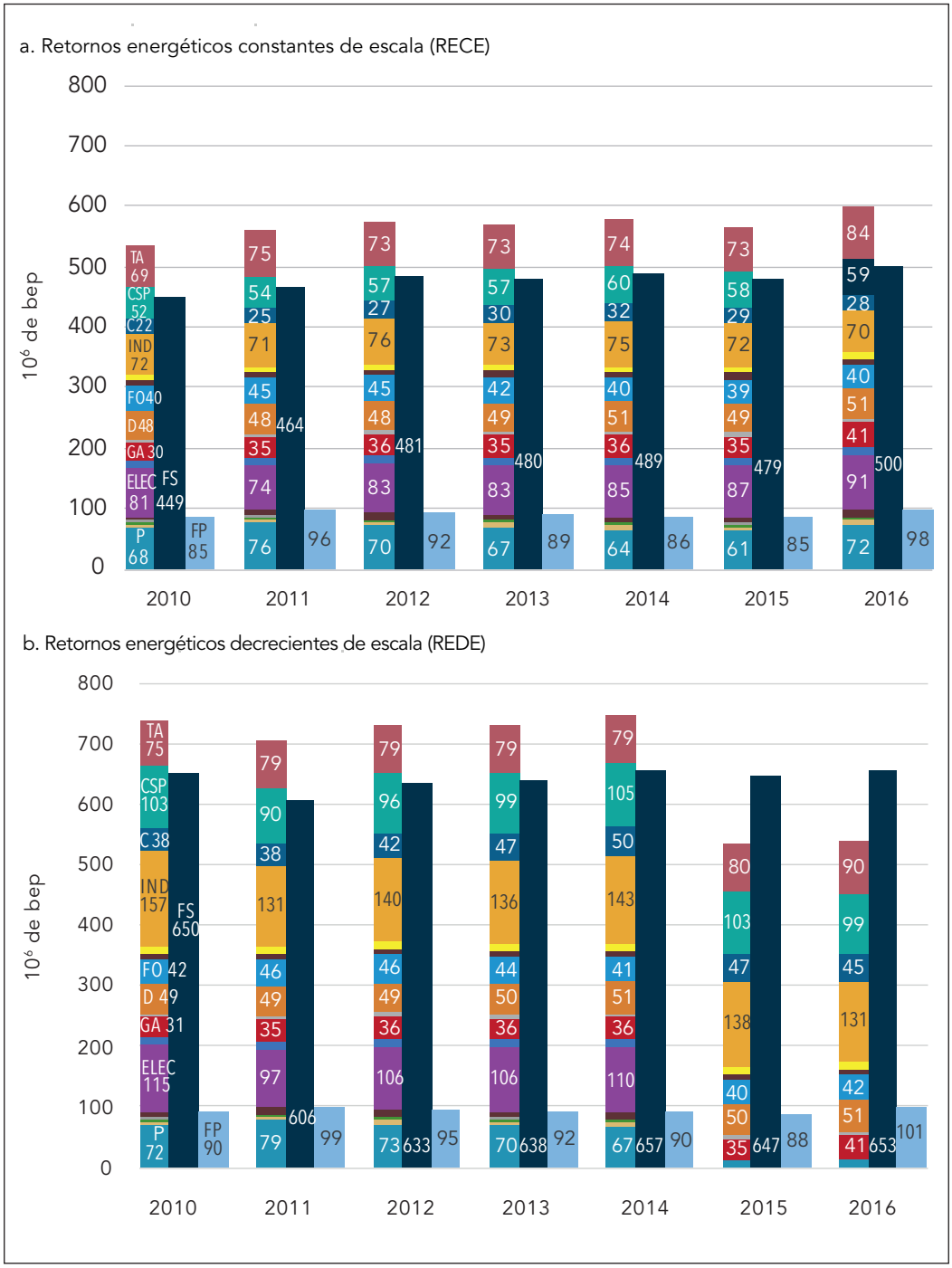
Retornos energéticos decrecientes de escala (REDE)

En esta sección presento los resultados del modelo de unidades híbridas, esta vez relajo el supuesto de RECE. Se reconoce que pueden existir pérdidas de eficiencia en el sistema, puesto que la producción de energía secundaria puede suponer algunas pérdidas de conversión. Por esta razón, el retorno de la energía primaria que se invierte puede ser inferior a la unidad o, en otros términos, puede resultar en retornos energéticos decrecientes de escala (REDE). Verifico esto a partir de los datos del proceso de transformación del balance energético.

La aplicación del modelo permite estimar los requerimientos energéticos directos y totales del sistema bajo condiciones de ineficiencia. En este caso constato que para todos los productos energéticos se mantiene la condición de eficiencia/ineficiencia identificada a partir del modelo básico con RECE. En otras palabras, el sentido de las relaciones se mantiene y la única diferencia es que se profundizan las condiciones de eficiencia o ineficiencia existentes. Esto resulta evidente en el caso de la electricidad, en donde bajo retornos constantes no se llegaba a requerir más de 0,9 unidades de energía primaria adicionales para generar electricidad, pero bajo retornos decrecientes se llegan a necesitar más de dos unidades adicionales de energía primaria. En la tabla 4.3 se puede contrastar con su similar del modelo básico de unidades híbridas.

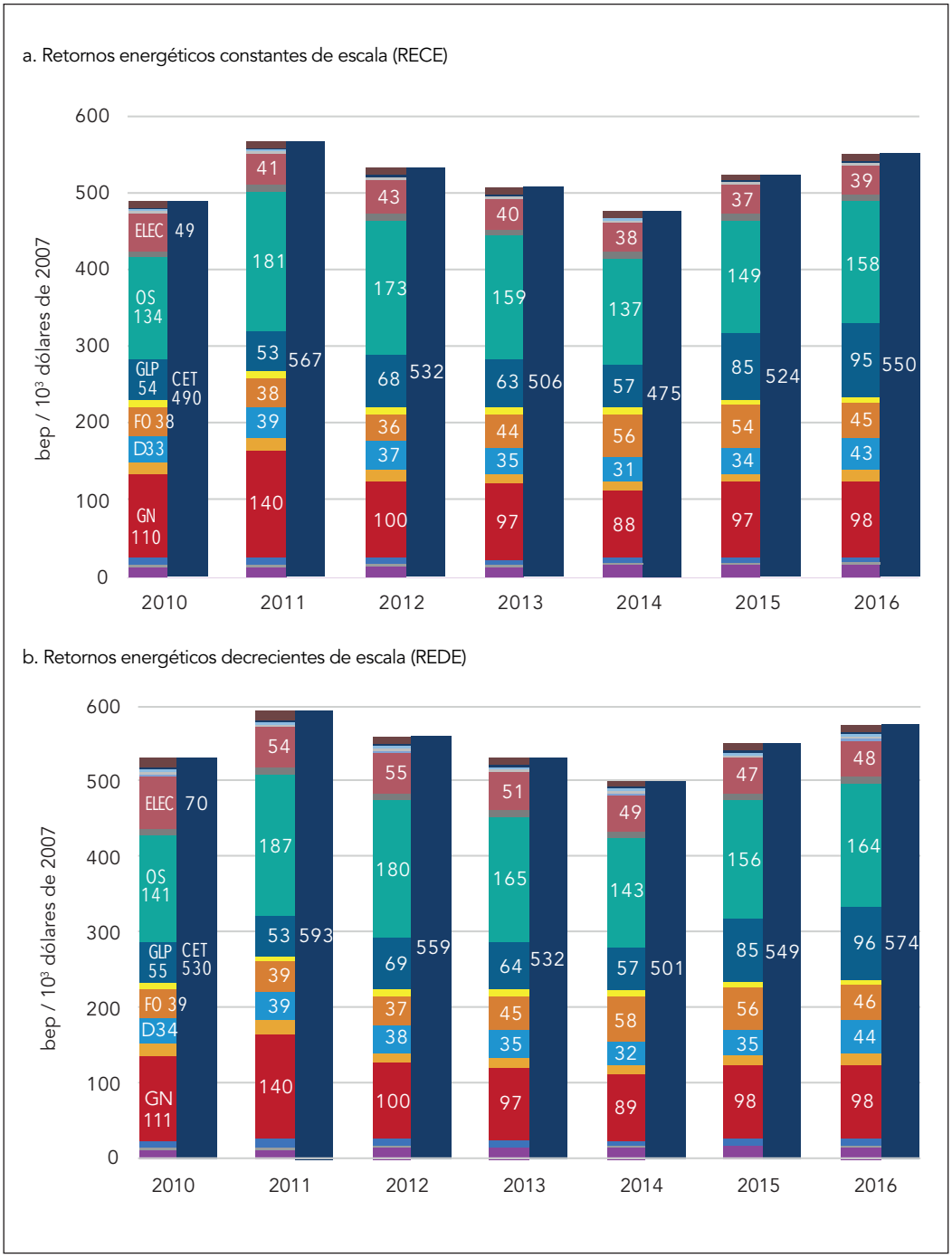
Al reconocer las condiciones de ineficiencia del sistema, se puede determinar las implicaciones en términos del uso absoluto de la energía por el factor $\alpha^{**}\hat{x}^{**}$. Presento la distribución por fuentes energéticas para el periodo de estudio en el gráfico 4.14, donde se muestra la comparación entre el modelo de unidades híbridas que aplica un esquema de RECE ($\alpha^{H}\hat{x}^{*}$) y el de REDE ($\alpha^{**}\hat{x}^{**}$). Se puede notar que la ineficiencia energética del sistema implica un incremento de entre 26 % y 38 % en los requerimientos energéticos. Así, por ejemplo, bajo retornos energéticos constantes se calcula que para 2010 se requirieron 534 millones de bep, pero bajo retornos energéticos decrecientes esta cifra alcanzó 739 millones de bep. En una escala temporal, de manera general se observa un incremento en los requerimientos energéticos bajo ambos esquemas de análisis.

Gráfico 4.14. Requerimientos totales de energía $\alpha^{H}\hat{x}^{*}$. MUH



Nota: (P) petróleo; (ELEC) electricidad; (GA) gasolinas y alcoholes; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (IND) industria; (C) construcción; (CSP) comercio, servicios y sector público; (TA) transporte y almacenamiento; (FS) fuentes secundarias de energía, y (FP) fuentes primarias de energía.

Gráfico 4.15. Coeficientes energéticos totales ε^H. MUH



Nota: (GN) gas natural; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (GLP) gas licuado de petróleo y otros gases; (OS) otras fuentes secundarias; (ELEC) electricidad, y (CET) coeficientes energéticos totales.

Finalmente, para contrastar estos resultados con los que presentaré en la siguiente sección, que corresponden al modelo de precios implícitos, expongo aquí los resultados de la matriz ε^H, que muestra los requerimientos totales de energía del sistema por cada 1000 dólares de la producción. En el gráfico 4.15 comparo las estimaciones correspondientes al modelo RECE con aquellos del modelo REDE.

Reconocer la ineficiencia energética del sistema implica en promedio un 5 % adicional de requerimientos energéticos directos e indirectos del sistema, que alcanzan un valor máximo de 574 bep por cada 1000 dólares de producción. Los principales componentes de dichas necesidades energéticas son el gas natural como fuente primaria y otras fuentes secundarias de energía. En conjunto, estas dos fuentes representaron durante el periodo de análisis entre el 47 % y 57 % del requerimiento energético total.

El método de precios implícitos

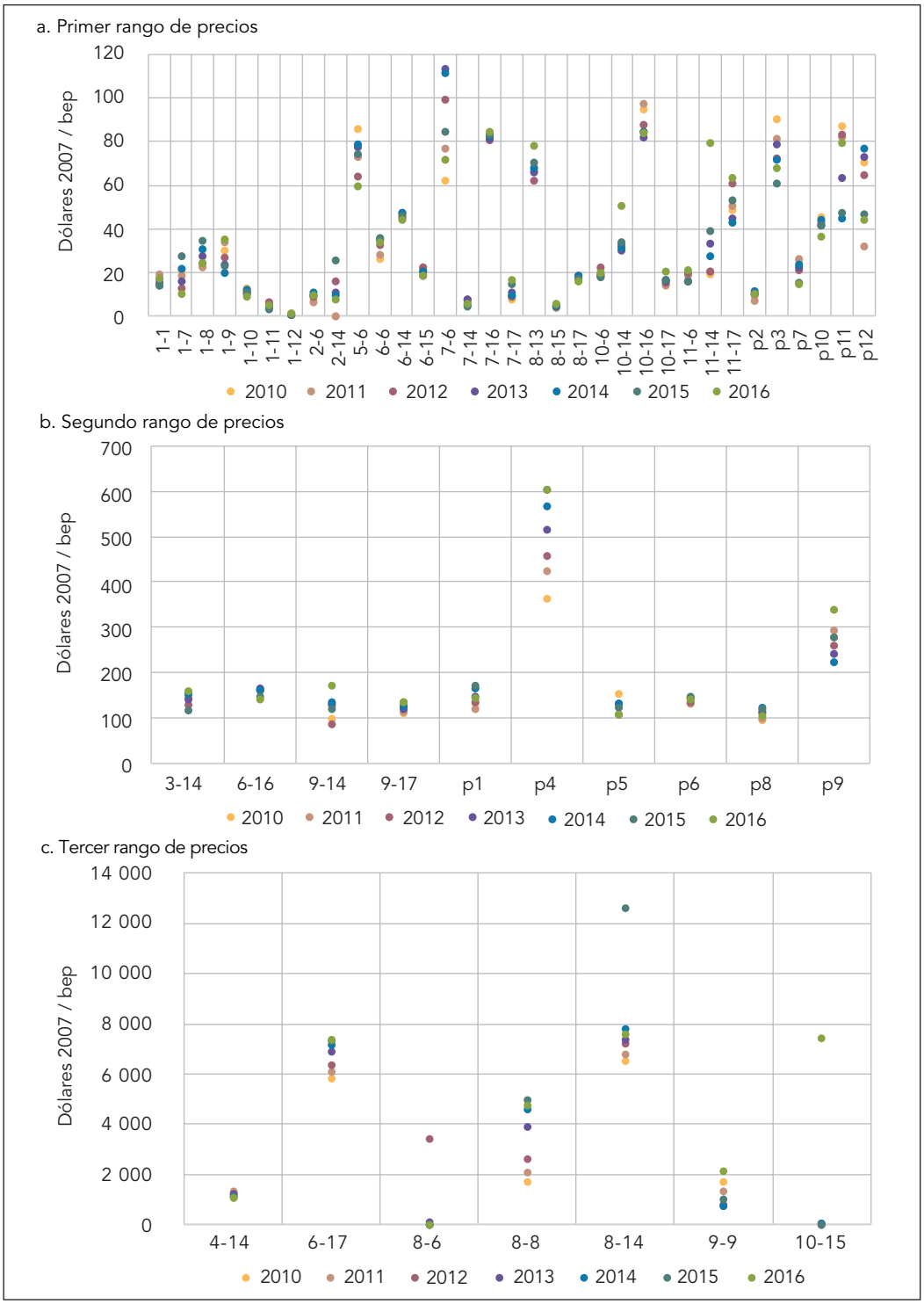
En esta sección presento los resultados de la aplicación del método de precios implícitos para construir matrices insumo-producto en términos físicos. Como en los otros casos, empleo un estudio de la economía ecuatoriana para el periodo 2010-2016. Expongo resultados para $\mathbf{m = 12}$ sectores energéticos a los que se suman dos sectores económicos $\mathbf{s = 5}$, por lo que $\mathbf{n = 17}$ sectores, en dos variantes del modelo. La primera se basa en una matriz de precios que corresponderá al que denomino modelo de precios implícitos no homogéneos, que se identificará como MPINH. La segunda variante se basa en un vector de precios que definirá el modelo de precios implícitos homogéneos, cuya identificación será MPI.

Precios no homogéneos

Tomo como punto de partida para definir la matriz de precios las matrices de intercambios económicos $\mathbf{Z}$ y energéticos $\mathbf{Z}^P$ que ya he utilizado en el modelo de unidades híbridas presentado en la sección previa. Hay que recordar que la matriz de precios implícitos se define por el cociente elemento a elemento de estas dos matrices.

En el gráfico 4.16 expongo los precios implícitos para valores no nulos. En el caso de los intercambios interindustriales estos se notan por la relación insumo-producto 1-2, 7-6, etc.; mientras que en el caso de los precios de la oferta total se notan como $\mathbf{p}_m$. Describo esta información en tres rangos de precios, el primero para aquellos que llegan hasta 120 $/bep (a), el segundo hasta 600 $/bep (b) y el tercero hasta 13 000 $/bep (c).

Gráfico 4.16. Precios implícitos para valores no nulos. MPINH



Nota: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado y otros; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*; (12) otras secundarias; (13) agro, pesca y minería; (14) industria; (15) construcción; (16) comercial, servicios y sector público, y (17) transporte y almacenamiento.

Los precios implícitos del segundo y tercer rango en la mayoría de los casos se han incrementado en 2016 en relación con el año 2010. En el primer rango, en cambio, solamente se han incrementado para 2016 la mayoría de precios del intercambio interindustrial, mas no la mayor parte de los precios implícitos de la oferta total de energía que, por el contrario, acumulan una reducción de entre 9 % y 43 %.

Cabe recordar que los precios implícitos no se pueden interpretar como los precios de mercado, de manera que estas cifras son solo referenciales de la estructura de precios que caracteriza a este sistema energético. Las trayectorias de cambio evidencian que diversas variaciones pueden tener lugar tanto en la dimensión económica como en la dimensión física del intercambio energético. Por ejemplo, los altos precios que se observan en la relación 8-14 del tercer rango, correspondiente a las gasolinas y alcoholes destinados al sector industrial, muestran un precio implícito que supera los 12 000 dólares de 2007 por bep, en 2015. Este valor evidencia una reducción de 62 % en el volumen de consumo anual de esta fuente secundaria de energía en el sector industrial de la economía. En efecto, en 2014, la industria consumió 6 Kbep y, en 2015, 4 Kbep. A diferencia del intercambio económico que apenas varió en -0,2 % entre 2014 y 2015.

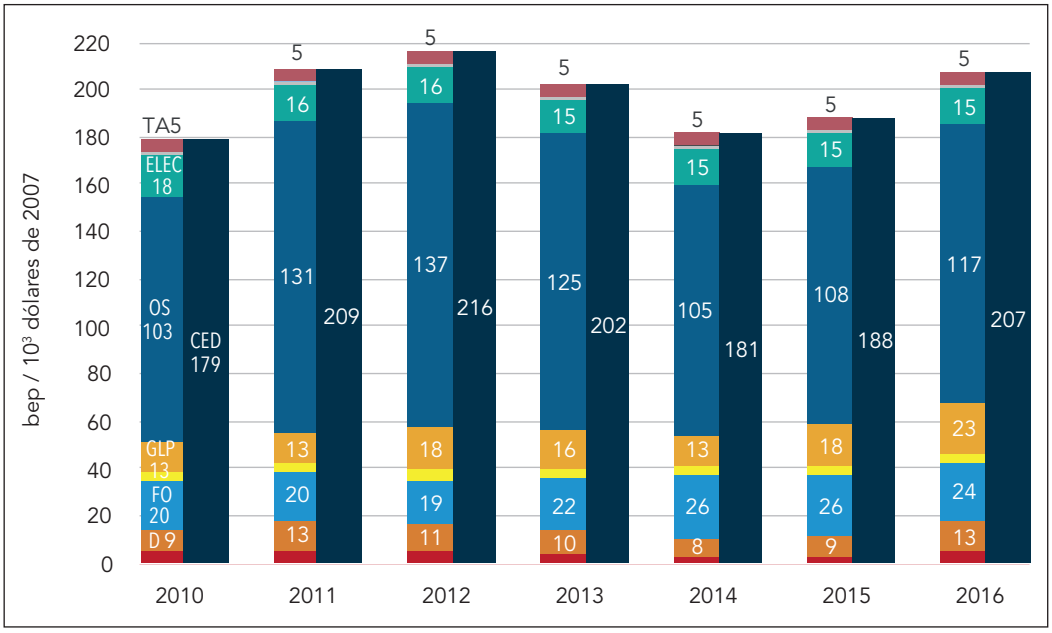
Ahora, analizo los resultados en términos de la intensidad energética del consumo intermedio a partir de la matriz de coeficientes energéticos directos **D,** cuyos resultados presento en el gráfico 4.17.

Estos coeficientes muestran la cantidad de energía que se requiere de forma directa por cada unidad de la oferta que se halla disponible. Durante el periodo de estudio, calculo que se requiere un mínimo de 179 y un máximo de 216 bep por cada 1000 dólares de la oferta total del sistema. El principal componente de estos requerimientos directos son otras fuentes secundarias de energía, que se cuentan por una participación de entre 57 % y 63 % de los requerimientos directos totales de cada año.

La cantidad total de energía del tipo **k** que se requiere de manera directa e indirecta por cada dólar de la producción del sector **j** para abastecer el consumo final se mide a partir de la matriz de coeficientes de intensidad energética total ε. En el gráfico 4.18 presento la suma de los requerimientos energéticos totales de cada sector para el periodo 2010-2016. Es preciso notar que las estimaciones de ε dependen del inverso de los precios implícitos del consumo final a través del factor $\tilde{\mathbf{Q}}^{f}$, razón por la cual pueden existir valores atípicos en estos resultados. Estos valores atípicos deberán omitirse en el reporte de resultados. Este es el caso del gas natural en mis cálculos porque se contrasta un consumo energético de 179 bep en 2010, al que corresponde un valor económico de cero.

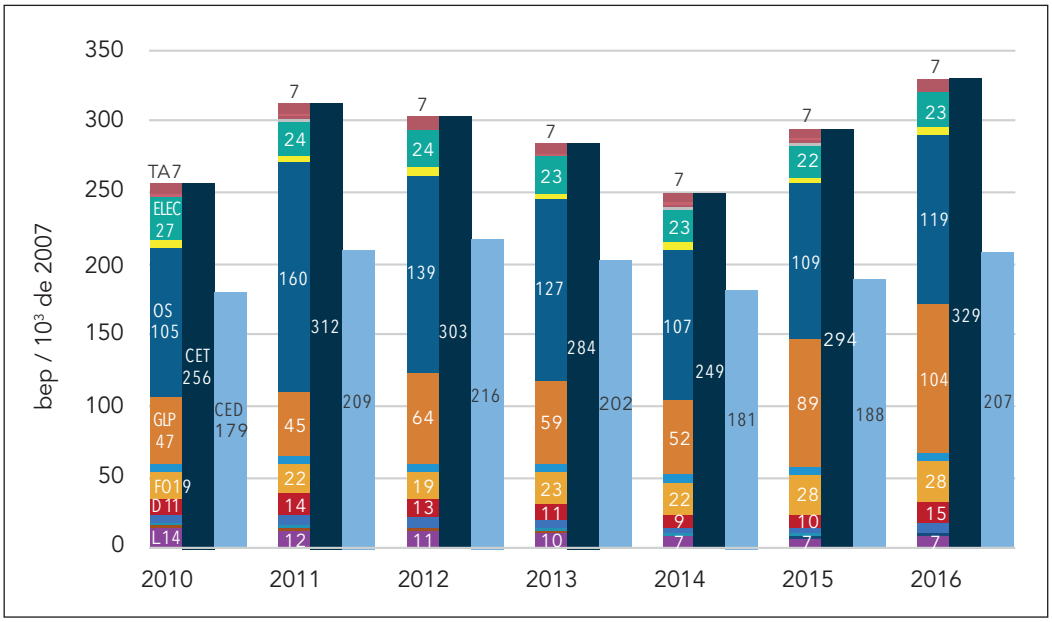
Con esta información, el factor $\tilde{\mathbf{Q}}^{f} = \frac{1}{\mathbf{p}_k^{f}}$ es una indeterminación que invalida el resto de las estimaciones del modelo. A fin de sortear esta indeterminación, propongo una modificación en los datos iniciales, por la que asigno un valor económico del consumo muy pequeño de 1×10^{-5} en lugar de cero, que permite procesar las estimaciones. Como resultado, $\tilde{\mathbf{Q}}^{f} = \frac{1}{\mathbf{p}_k^{f}} = 148 \times 10^{6}$. Es decir, según este cálculo, se requerirían 148 millones de bep de gas natural por cada dólar de la oferta, que constituye un valor atípico que omito del reporte de la matriz ε. Con esta aclaración, presento los resultados que contrastan los coeficientes de requerimientos directos e indirectos de energía (gráfico 4.18).

Gráfico 4.17. Coeficientes energéticos directos. MPINH



Nota: (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (GLP) gas licuado y otros; (OS) otras fuentes secundarias; (ELEC) electricidad; (TA) transporte y almacenamiento, y (CED) coeficiente energético directo.

Gráfico 4.18. Requerimientos directos e indirectos de energía. MPINH



Nota: (L) leña; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (GLP) gas licuado y otros; (OS) otras fuentes secundarias; (ELEC) electricidad; (TA) transporte y almacenamiento; (CET) coeficiente energético total, y (CED) coeficiente energético directo.

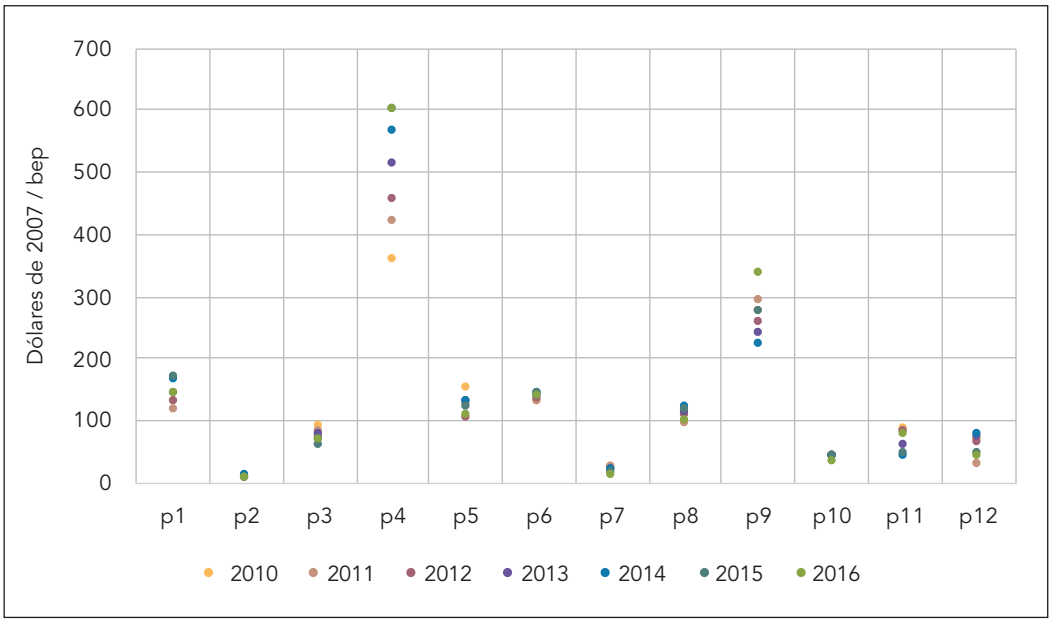
Estos resultados son muy diferentes de aquellos que se obtienen al aplicar un modelo más agregado. En el capítulo previo utilicé el mismo procedimiento con igual información de base, aunque en ese caso agregada a seis sectores (cuatro energéticos y dos económicos). Precisamente, la agregación de la información es el origen de las distorsiones en los resultados. En el capítulo previo reporté que para el año 2016 por cada 1000 dólares de la producción de toda la economía se necesitaron 54 bep de las diversas fuentes, principalmente electricidad y derivados de petróleo, que permitieron abastecer el 80 % del consumo final del sistema (40 % en cada caso). Ahora, en un análisis desagregado para 17 sectores (12 energéticos y cinco económicos), encuentro que, para el mismo año, los requerimientos energéticos totales para todo el sistema alcanzan 329 bep por cada 1000 dólares de la producción económica nacional. Es decir, la subestimación debido a la agregación de la información es sustancial y se cuantifica en una proporción de seis a uno. Además, las diferencias no solamente ocurren en términos de escala, sino también en la composición de los flujos. Para 2016, el modelo desagregado para 17 sectores permite identificar que el gas licuado de petróleo, otros gases y otras fuentes secundarias de energía abastecieron el 68 % de los requerimientos energéticos de la economía. La electricidad, en cambio, solo abasteció el 7 % de las necesidades totales. En definitiva, aunque los resultados de un modelo con información agregada sean consistentes, estos pueden expresar sesgos importantes en la escala y en la estructura de las estimaciones.

Asimismo, comparo estos resultados con aquellos que se derivan de la aplicación del modelo de unidades híbridas. Se puede ver que el cálculo de los coeficientes energéticos es mayor que al emplear el método de precios implícitos. De hecho, tanto las ratios que proceden del esquema con retornos constantes como del esquema de retornos decrecientes son el doble de las ratios que corresponden al método de precios implícitos. No obstante, como expliqué en el capítulo previo, estos datos en realidad no son comparables. En efecto, el concepto de intensidad energética o su recíproco, los precios implícitos en la variante de precios no homogéneos, permiten analizar los requerimientos energéticos asociados a los intercambios de carácter exclusivamente energético. En cambio, el modelo de unidades híbridas sirve para analizar los requerimientos que se hallan asociados tanto a los intercambios energéticos como a los económicos, medidos en unidades híbridas, es decir, cada uno en sus propias unidades. En estas condiciones se entienden las diferencias en los resultados porque son lecturas de sistemas distintos. Más adelante, en el gráfico 4.23 comparo los resultados obtenidos con los diferentes métodos.

Precios homogéneos

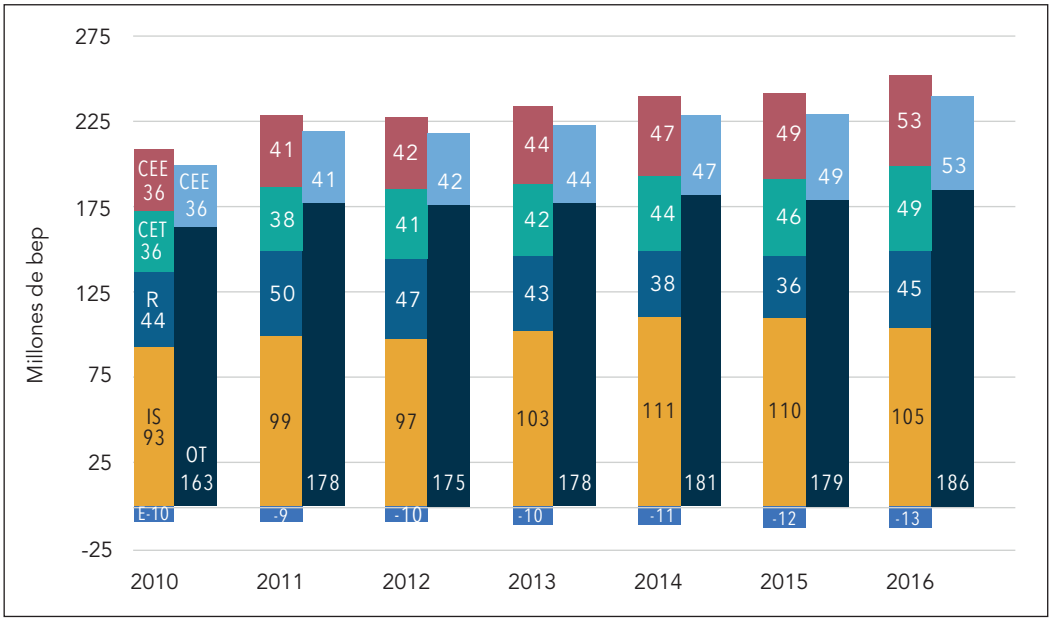
En primer lugar, expongo los precios promedio que permiten analizar el funcionamiento del sistema energético. Estos constituyen precios implícitos del sistema, en este caso se asumen como homogéneos, y el modelo se identifica como MPI. No son precios de mercado, esto significa que son valores referenciales de la evolución de los flujos económicos relativos a cada unidad energética que compone la oferta. En el gráfico 4.19 presento esta información desagregada por año y por sector.

Gráfico 4.19. Precios implícitos homogéneos



Nota: Los sectores se indican en el eje horizontal como subíndice de la variable de precios $\mathbf{p}_k$. Los sectores son (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado de petróleo y otros gases; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*, y (12) otras fuentes secundarias.

Gráfico 4.20. Condiciones de balance del sistema. MPI



Nota: (E) emisiones; (IS) insumos satélite; (R) residuos; (CET) consumo energético de la transformación, y (CEE) consumo energético de los sectores económicos; (OT) oferta total.

Entre 2010 y 2016 algunos precios implícitos aumentan y otros disminuyen. Las mayores variaciones se identifican con el aumento en el precio de los derivados de petróleo en un monto acumulado de 67 % entre 2010 y 2016, y una reducción en el precio implícito del gas licuado de petróleo en un factor acumulado de 43 % durante el mismo periodo.

Este esquema implica una lectura de los intercambios económicos en unidades energéticas; por esta razón, la estructura de la matriz de intercambios interindustriales y de las cuentas físicas de balance son distintas a las que se emplearon en el esquema de precios no homogéneos. En el gráfico 4.20 muestro los datos correspondientes.

Entre las cuentas de balance, esta vez se registran residuos. Hay que recordar que esta categoría se refiere a aquellos recursos que resultan como subproductos de la actividad económica, que en este caso se estiman entre el 16 % y el 23 % de la oferta nacional de energía. Cuando la unidad de análisis sea la materia en lugar de la energía, otra forma de leer este rubro será como aquella proporción de los desperdicios que se puede reciclar. Esta lectura sería incorrecta para el caso de la energía porque no existen posibilidades de reciclaje. Un rasgo importante en estos flujos es que los insumos netos constituyen la mayor parte de la oferta total de energía del sistema. El consumo de energía para fines de transformación y para fines económicos en conjunto, es el segundo componente significativo.

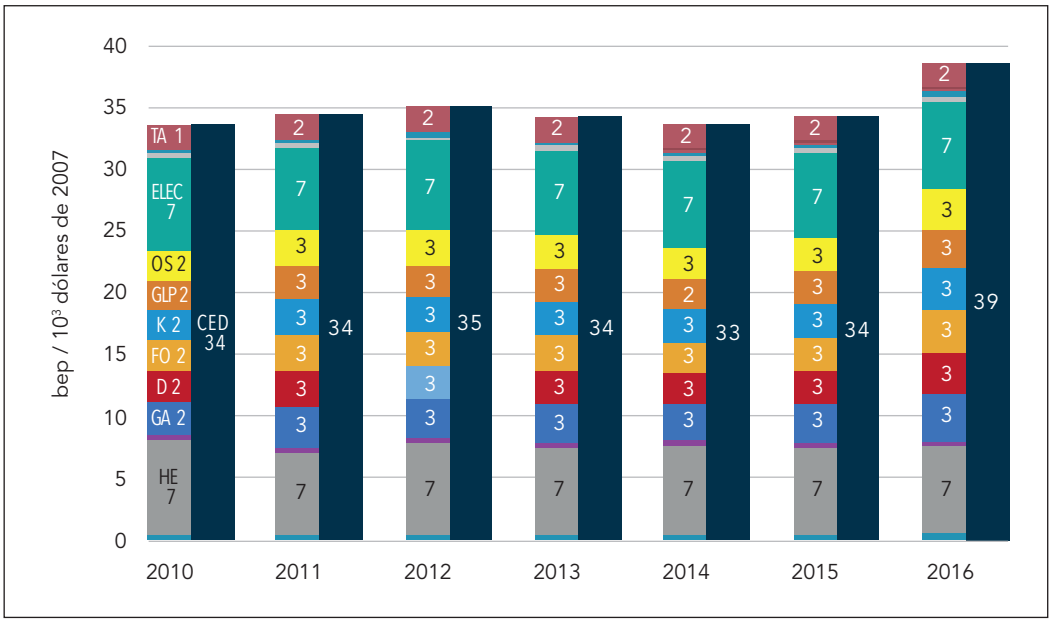
El modelo de precios implícitos comprende la estimación de los requerimientos energéticos directos e indirectos que bajo el supuesto de un esquema homogéneo de precios serán distintos a los requerimientos que expuse en la sección previa. Para empezar, analizo los requerimientos directos en relación con la producción nacional de energía a partir de la matriz **D** (gráfico 4.21).

Al contrastar estos resultados con aquellos que se derivan del modelo de precios implícitos no homogéneos, identifico una diferencia promedio de uno a seis en los coeficientes energéticos directos. Cuando se asumen precios implícitos homogéneos, estos coeficientes son cinco o seis veces más bajos. También la composición de estos flujos es diferente y se halla más diversificada. En este caso la hidroelectricidad y la energía eléctrica son las principales fuentes de energía y representan entre 36 % y 44 % de los requerimientos totales del sistema. Hay que recordar que el modelo de precios no homogéneos permitió identificar a otras fuentes secundarias como el principal componente directo de las necesidades energéticas.

Los requerimientos energéticos totales, que incluyen las necesidades directas e indirectas de energía por cada dólar de la producción del sistema, se miden a partir de la matriz de coeficientes de intensidad energética total ε (gráfico 4.22).

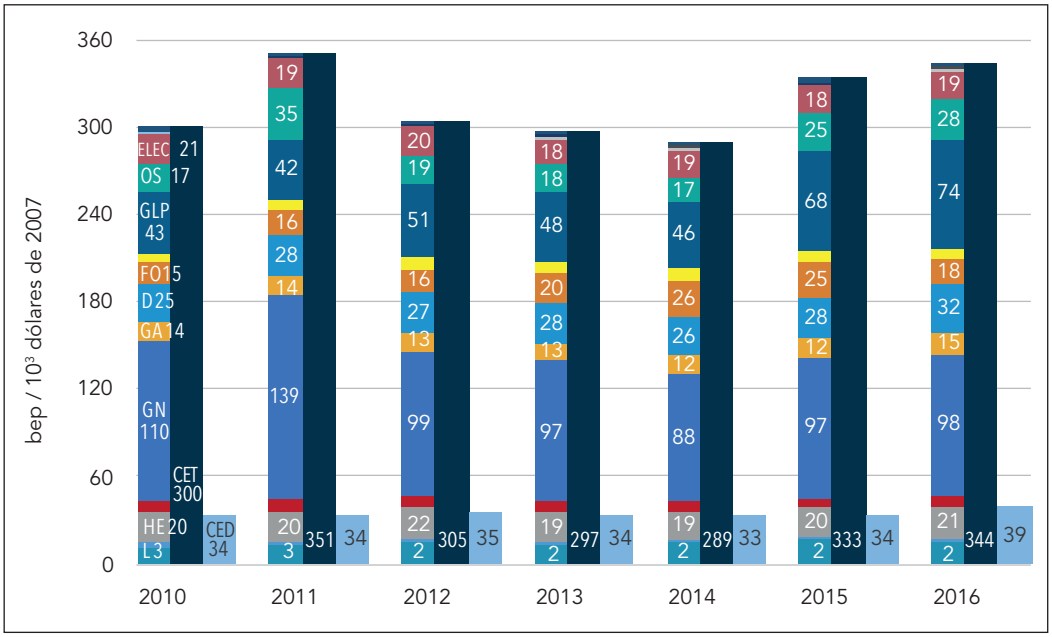
A diferencia del modelo de precios no homogéneos, en este caso el componente energético indirecto es la principal proporción de las necesidades energéticas del sistema. Se calcula que solamente entre el 10 % y 12 % de los requerimientos totales se explican por un componente directo mientras que el resto por el componente indirecto. El gas natural es la principal fuente y puede alcanzar hasta el 40 % de los requerimientos totales de energía. En este esquema de precios implícitos promedio no se producen indeterminaciones porque el modelo se desarrolla solamente para aquellas categorías de energéticos sobre las que se puede contrastar la información económica y física.

Gráfico 4.21. Requerimientos directos de energía. MPI



Nota: (HE) hidroenergía; (GA) gasolinas y alcoholes; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (KJ) kerosene y *jet fuel*; (GLP) gas licuado y otros gases; (OS) otras fuentes secundarias; (ELEC) electricidad; (TA) transporte y almacenamiento, y (CED) coeficiente energético directo.

Gráfico 4.22. Requerimientos totales de energía. MPI

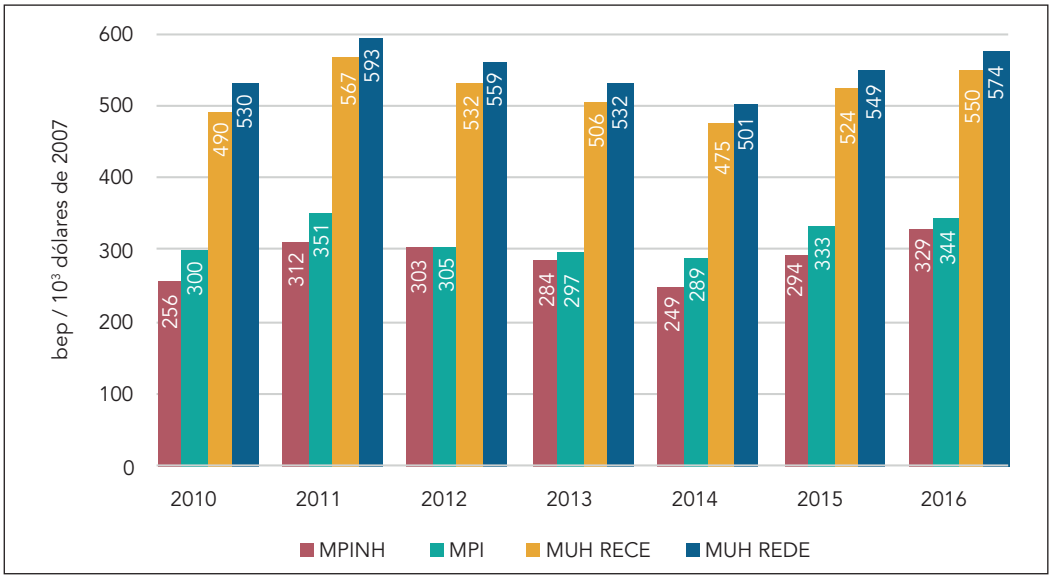


Nota: (L) leña; (HE) hidroenergía; (GN) gas natural; (GA) gasolinas y alcoholes; (D) diésel; (FO) *fuel oil*; (GLP) gas licuado y otros gases; (OS) otras fuentes secundarias; (ELEC) electricidad; (CET) coeficiente energético total, y (CED) coeficiente energético directo.

En este caso también se ve que el proceso de agregación puede introducir distorsiones importantes. Así, para el año 2016 calculo requerimientos energéticos directos de 12 bep por cada 1000 dólares de 2007 de la producción en la estimación agregada a solo seis sectores. En cambio, con un modelo de 17 sectores determino que el requerimiento directo alcanza 39 bep por cada 1000 dólares. Esto significa que la agregación, en este caso produjo una subestimación de los requerimientos energéticos directos del orden de 1:3. Con los coeficientes energéticos totales, en cambio, con el modelo agregado calculo requerimientos de 55 bep/1000 dólares para 2016, esto es, seis veces menos que al desagregar esta información para 17 sectores: 344:55. Asimismo, son distintos los componentes de cada coeficiente. En el modelo con información agregada son los derivados de petróleo la mayor proporción, mientras que en el modelo con información desagregada es el gas natural. Estos sesgos pueden tener no solo limitaciones analíticas importantes, sino también limitaciones en la definición de políticas públicas alrededor de las intensidades energéticas de los distintos sectores.

Finalmente, como he indicado antes, los requerimientos energéticos que se obtienen a partir del modelo de precios implícitos respecto del modelo de unidades híbridas no serán comparables. La principal razón descansa en que la combinación de unidades de medida en el caso del modelo de unidades híbridas permite dimensionar los intercambios energéticos desde sus propias características. No ocurre lo mismo con el modelo de precios implícitos, que puede mostrar el desempeño del propio sistema energético o del sistema económico solamente desde las unidades energéticas. Por estas razones, los requerimientos energéticos directos e indirectos del modelo de unidades híbridas son superiores durante todo el periodo de análisis (gráfico 4.23).

Gráfico 4.23. Requerimientos energéticos totales según el método de análisis



Nota: (MPINH) método de precios implícitos no homogéneos; (MPI) método de precios implícitos homogéneos; (MUH) método de unidades híbridas; (RECE) retornos energéticos constantes de escala, y (REDE) retornos energéticos decrecientes de escala.

Comentarios finales

En este capítulo he presentado los resultados de la aplicación de tres métodos de construcción de matrices insumo-producto físicas para el caso de la economía ecuatoriana, durante el periodo 2010-2016. Identifico el consumo energético intersectorial en cada caso con resultados que no son comparables entre todas las metodologías porque parten de supuestos distintos para su construcción.

El método de la energía primaria incorporada, aunque constituye un método de precios implícitos, se diferencia respecto del procedimiento convencional porque identifica la cantidad de energía primaria que se requiere invertir para generar la energía secundaria que produce el sistema. Los cálculos de consumo intersectorial que resultan de la aplicación del método de precios implícitos no se pueden comparar con los resultados del método de unidades híbridas. El marco de análisis es distinto porque este último procedimiento permite incorporar en un solo esquema tanto unidades energéticas como económicas, lo que deriva en un sistema híbrido que no es comparable con un sistema puramente económico o puramente energético.

Respecto del método de precios implícitos he aplicado dos variantes. La primera se desarrolla desde un esquema de precios no homogéneos, y se verifica que sus resultados se corresponden con el desarrollo de una matriz física de entradas y salidas de energía. Es decir, se realiza desde esta perspectiva una lectura del sistema energético nacional. En la segunda variante apliqué el método de precios implícitos a partir de un esquema homogéneo de precios. Esta variante del modelo genera resultados que pueden interpretarse como la dimensión física de los flujos del intercambio económico. En otras palabras, se trata de una lectura energética del funcionamiento del sistema económico.

En cuanto al método de unidades híbridas también he manejado dos variantes. La primera se basa en un modelo con RECE, y la segunda con retornos decrecientes. Mi principal observación es que existe un incremento sustancial en el consumo energético intersectorial una vez que se reconocen las condiciones estructurales del sistema energético que caracteriza a la realidad nacional. Es decir, cuando se reconoce que pueden existir pérdidas energéticas en la conversión durante la producción de energía secundaria.

Capítulo 5
Encadenamientos económicos y energéticos y su clasificación

Una vez que he construido las matrices insumo-producto en unidades físicas, el siguiente paso es buscar herramientas para analizar esta información. La evaluación de encadenamientos ha sido tradicionalmente empleada para este fin, porque a partir de sencillos indicadores de conexiones intersectoriales se pueden categorizar las actividades por su grado de dependencia o contribución al sistema económico o, como ha sido mi interés en este libro, categorizar los sectores que intercambian en el sistema energético del Ecuador para el año 2016.

En este capítulo expongo los indicadores de encadenamientos que permiten diferenciar entre los sectores que proveen insumos al sistema de aquellos que dependen de este para su funcionamiento. Explico la construcción de estos indicadores en la primera sección y algunas variantes que permiten evaluar a profundidad los intercambios. La distinción básica que normalmente se propone para el análisis corresponde a los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, así como también los encadenamientos directos de los totales que incluyen las conexiones interindustriales que se producen indirectamente. Estos indicadores se complementan con la construcción de versiones normalizadas para adaptar mejor las opciones de comparabilidad de la información. Finalmente, introduzco indicadores para identificar los encadenamientos que obedecen a la propia estructura de cada sector, tanto en la oferta como en la demanda, pero también aquellos encadenamientos que suelen denominarse puros o netos, los cuales corresponden a la estructura del sistema y no a un sector en particular.

Mi contribución respecto de estos indicadores, que no son nuevos, sino que se usan con regularidad en la literatura sobre matrices insumo-producto, corresponde a la adaptación del planteamiento de estos indicadores para el análisis energético. En particular, considero valiosa la adaptación para el caso específico del modelo de unidades híbridas, en donde resuelvo la dificultad inherente al manejo de más de una unidad de análisis dentro de las matrices insumo producto físicas, cuyo balance no es idéntico entre los totales de filas y columnas.

Estos elementos sirven de base para aplicar una clasificación sectorial orientada a identificar como claves a los sectores con altos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, y también aquellos que carecen de vinculaciones significativas y por ello operan de manera independiente respecto del resto de las actividades en el sistema. En el medio de estas dos

categorías se ubican sectores que dependen de los demás sea por la provisión o por el uso de insumos económicos o energéticos.

Estas categorías se intersecan con el grado de dispersión de los datos de base que miden los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás. Es decir, se considera el grado de homogeneidad de la información correspondiente a cada una de las categorías de encadenamientos. Así, por ejemplo, pueden existir sectores clave dentro del sistema energético cuyos encadenamientos totales muestran poca homogeneidad o se hallan muy dispersos, así como también pueden existir sectores altamente similares entre sí debido a los encadenamientos que se hallan asociados.

En la segunda parte de este capítulo aplico, como a lo largo del libro, el análisis de los encadenamientos tanto en la dimensión económica como en la energética para el caso ecuatoriano en 2016. Puesto que enfatizo en el estudio del sistema energético, he utilizado tanto el modelo de energía incorporada como el modelo de unidades híbridas para explicar los resultados correspondientes a la construcción de estos indicadores. Estas aplicaciones son útiles además para encontrar la consistencia analítica de ambos métodos de matrices insumo-producto físicas. Argumento que una buena parte de los encadenamientos resultantes del modelo de energía incorporada se corresponden con la estructura del sistema económico, mientras que el de unidades híbridas es más consistente para analizar los intercambios atinentes al sistema energético nacional.

En la sección final del libro muestro los resultados interanuales del cálculo de encadenamientos en el sistema energético. Parto del supuesto de que se trata de una economía pequeña, con escasa diversificación productiva y energéticamente concentrada en las fuentes y en los usos energéticos. Todas estas condicionantes hacen plausible esperar que la estructura de encadenamientos varíe poco con el transcurso de los años, a pesar de que durante el periodo de análisis, años 2010 a 2016, se emprendió el programa de transición energética más ambicioso de la historia contemporánea del Ecuador. Argumento la presencia de una rígida estructura porque prevalece la notable dependencia económica y energética respecto de la actividad petrolera, a pesar de que existió un notable esfuerzo para potenciar al sector hidroeléctrico.

Estudio de los encadenamientos productivos

Enfoques de oferta y demanda en las matrices insumo-producto

Hasta ahora he aplicado un enfoque de demanda para estudiar los intercambios de insumos y productos. En efecto, a través de la matriz de coeficientes técnicos del modelo de Leontief, es decir, la matriz **A** que he empleado, relaciono la producción sectorial bruta con la demanda final.

Los coeficientes de insumos directos se definen por $\mathbf{A} = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{x}}^{-1}$, lo que determina que $\mathbf{x} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f} = \mathbf{L}\mathbf{f}$. Así, la inversa de Leontief $\mathbf{L} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$ se relaciona con cada unidad del producto que deja el sistema interindustrial al final del proceso (Miller y Blair 2009).

Una de las lecturas alternativas que han sido propuestas desde el enfoque de la oferta corresponde a Ghosh (1958). El autor sugiere relacionar el producto sectorial bruto con los insumos primarios en lugar de la demanda final, es decir, con cada unidad del valor que ingresa al sistema interindustrial al inicio del proceso (Miller y Blair 2009).

En este caso, el equivalente a la matriz de coeficientes técnicos es la matriz **B**, cuyos elementos $\mathbf{b}_{ij}$ muestran los coeficientes de productos directos que suelen denominarse coeficientes de asignación o de distribución, en contraste con los coeficientes técnicos que corresponderían al análisis paralelo desde el enfoque de demanda. Esta matriz se define como $B = \hat{\mathbf{x}}^{-1}Z$. Cada uno de estos elementos $\mathbf{b}_{ij}$ representa la distribución de los productos del sector **i** entre los sectores **j** que compran insumos interindustriales de **i**.

Para el modelo construido desde un enfoque de demanda, se conoce que la oferta total se define como $\mathbf{x = Z1}_n \mathbf{+ f}$. En el caso del modelo de oferta, el equivalente será $\mathbf{x' = 1'}_n\mathbf{Z + v'}$, donde **v**, de dimensión **n x 1**, representa el vector de valores monetarios agregados de cada sector.[1] En la versión más detallada de una tabla de oferta-utilización, el vector **v** contabilizará, además del valor agregado bruto, los impuestos netos sobre la producción y las importaciones. Desde esta lectura, los intercambios intersectoriales se pueden expresar como $\mathbf{Z = \hat{x}B}$, lo que resulta en $\mathbf{x' = 1'}_n \mathbf{\hat{x}B + v'}$. Puesto que $\mathbf{1'}_n\mathbf{\hat{x} = x'}$, entonces $\mathbf{x' = x'B + v'}$, lo que puede simplificarse como $\mathbf{x' = v'}\ (\mathbf{I}_n\mathbf{- B})^{-1}$. En equivalencia al modelo de Leontief, se puede denominar como la inversa de Ghosh a la matriz $\mathbf{G} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{B})^{-1}$, lo que a su vez resulta en $\mathbf{x' = v'G}$. Una forma de interpretar **L** y **G** es como la inversa de los insumos y la inversa de los productos, respectivamente.

Otra forma de expresar la oferta total es a partir de la transpuesta de $\mathbf{x' = x'B + v'}$, es decir,[2] $\mathbf{x = B'x + v}$, que se puede despejar como $\mathbf{x}=(\mathbf{I}_n - \mathbf{B'})^{-1}\mathbf{v}$. En este caso, $\mathbf{G'} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{B'})^{-1}$, con lo cual, $\mathbf{x = G'v}$.

Miller y Blair (2009, 544) explican que "el supuesto central del enfoque de oferta es que las distribuciones de la producción en los coeficientes $\mathbf{b}_{ij}$ son estables en el sistema económico", lo que significa que si por ejemplo "el producto del sector **i** se duplica, entonces las ventas desde **i** a cada uno de los sectores que compran desde **i** también se duplicarán". En lugar de coeficientes de insumos fijos, como opera el enfoque de demanda, se asumen coeficientes de productos fijos desde la perspectiva de Ghosh.[3]

Indicadores de encadenamientos en los modelos insumo-producto

Los encadenamientos productivos definen la interconexión de un sector en particular con otros sectores de la economía, dichas interconexiones pueden mostrar dos direcciones: hacia atrás y hacia adelante; y también dos niveles: directos y totales (estos últimos incluyen, además de los efectos directos, los indirectos).

---

[1] En las matrices con un balance idéntico entre los totales de filas y columnas suelen incluirse además del valor agregado, las importaciones y los impuestos.

[2] Aquí cabe recordar que son propiedades del álgebra de matrices las siguientes: $(A \pm B)' = A' \pm B'$, $(A')^{-1} = (A^{-1})'$

[3] Cuando se analizan cambios en la demanda final pueden advertirse problemas de estabilidad conjunta, que no estudio en este libro. Al respecto se puede revisar Dietzenbacher (1989); Miller (1989); Rose y Allison (1989); Chen y Rose (1991) y Miller y Blair (2009).

Los efectos directos miden los efectos que resultan de una primera fase de intercambios, es decir, los estímulos para otros sectores que se originan en la demanda de insumos o su venta. Esto corresponde al impacto directo desde un sector determinado hacia el resto de la economía. Los efectos totales incluyen los efectos directos y también los indirectos, es decir, aquellos que se producen en las siguientes rondas de transacciones (Boundi Chraki 2016).

Los encadenamientos hacia atrás se refieren a los efectos en aquellos sectores que proveen insumos a un determinado sector, mientras que los encadenamientos hacia adelante se refieren a los efectos en aquellos sectores a los cuales un determinado sector vende su producción. En otras palabras, los encadenamientos miden la transmisión de efectos económicos desde un sector específico hacia los demás.

Para incrementar la producción de un sector **j** será necesario aumentar la demanda de los sectores cuyos bienes se emplean como insumos para la producción de **j**. En este caso se identifica la transmisión de efectos hacia atrás de esta cadena productiva. Este análisis se puede realizar desde el enfoque de la demanda.

Desde el enfoque de la oferta, se identifica que se encuentran disponibles cantidades adicionales del producto del sector **j** que sirven de insumos para la producción de otros sectores. Es decir, se analizan los encadenamientos hacia adelante porque se mide la transmisión de efectos económicos hacia los sectores que producen bienes a partir de la producción del sector **j**.

En lo que sigue mostraré los indicadores de base para medir la fuerza de las conexiones, aunque existen además otras versiones más o menos complejas. Convencionalmente, los sectores con mayores conexiones hacia atrás y hacia adelante suelen definirse como sectores clave o sectores de liderazgo porque su comportamiento puede impulsar el desarrollo de otros sectores dentro del sistema económico. Es decir, si el vínculo del sector **i** es mayor que el vínculo correspondiente del sector **j**, se puede concluir que la expansión de un dólar en la producción del sector **i** será más beneficiosa para la economía que una expansión igual en la producción del sector **j**. Cuando el vínculo es hacia atrás, será más beneficiosa en términos de la actividad productiva que se genera a partir de este sector en toda la economía. Cuando el vínculo es hacia adelante, será más beneficiosa desde el punto de vista de toda la actividad productiva que se podrá apoyar desde el sector **i**.

Encadenamientos hacia atrás

Los vínculos directos hacia atrás del sector **j** se pueden medir como la cantidad por la cual la producción del sector **j** depende directamente de los insumos interindustriales:

$$\mathbf{BL(d)}_j = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{a}_{ij}$$

Esta expresión será equivalente en términos vectoriales al vector $\mathbf{b(d)} = \mathbf{1'}_n\mathbf{A}$.

Los vínculos totales, que incluyen encadenamientos directos e indirectos, se pueden cuantificar a partir de la matriz de requerimientos totales **L**, es decir, desde la inversa de Leontief (Guitton 1957):

$$\mathbf{BL(t)}_j = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{l}_{ij}$$

Esta expresión será equivalente al vector $\mathbf{b(t)} = \mathbf{1'_nL}$.

En ambos indicadores los elementos sobre la diagonal principal de **A** o de **L** podrán ser omitidos si se requieren analizar encadenamientos propios de cada sector, como se verá más adelante.

La versión normalizada de estos indicadores corresponde al índice del poder de la dispersión de Guitton (1957). Para el caso de los encadenamientos directos la defino como $\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(d)}$ y para los totales como $\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(t)}$:

$$\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(d)} = \frac{\mathbf{n1'_nA}}{\mathbf{1'_nA1_n}}$$

$$\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(t)} = \frac{\mathbf{n1'_nL}}{\mathbf{1'_nL1_n}}$$

Donde la barra es indicativa de la normalización y el producto $\mathbf{1'_nA1_n}$ es un escalar, como también lo es $\mathbf{1'_nL1_n}$. El valor promedio de los elementos de $\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(d)}$ es la unidad, de manera que se interpreta que aquellos sectores con vínculos directos hacia atrás que se hallan por encima del promedio tendrán índices mayores a uno y serán más fuertes. Por el contrario, los que muestren índices inferiores a la unidad serán más débiles. Se interpreta de manera similar para $\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(t)}$.

Cuando el análisis se centra en los indicadores de encadenamientos directos, se puede emplear la clasificación propuesta por Schuschny (2005), quien categoriza a los sectores en manufactureros y no manufactureros por sus encadenamientos hacia atrás. Los primeros serán aquellos que muestren un alto índice ponderado de encadenamientos hacia atrás $\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(d)}>1$. Los sectores no manufactureros serán aquellos cuyos encadenamientos hacia atrás son bajos $\bar{\mathbf{b}}\mathbf{(d)}<1$. Según esta concepción de los encadenamientos, los sectores no manufactureros son aquellos que evidencian una baja demanda de insumos.

Encadenamientos hacia adelante

La lectura de estos encadenamientos la realizo desde el enfoque de Ghosh, mediante indicadores paralelos a los que corresponden a los encadenamientos hacia atrás conforme plantean Beyers (1976), Jones (1976) y Chenery y Watanabe (1958).

Para el caso de los encadenamientos directos hacia adelante, la formulación será:

$$\mathbf{FL(d)}_i = \sum_{j=1}^{n} \mathbf{b}_{ij}$$

o su equivalente en términos vectoriales $\mathbf{f(d) = B1_n}$

Los encadenamientos totales hacia adelante son $\mathbf{FL(t)_i=\sum_{j=1}^{n} g_{ij}}$ o su equivalente, en términos vectoriales, $\mathbf{f(t) = G1_n}$

La versión normalizada de los encadenamientos hacia adelante será:

$$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{d}) = \frac{\mathbf{nB1_n}}{\mathbf{1'_nB1_n}}$$

$$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{nG1_n}}{\mathbf{1'_nG1_n}}$$

Cuando el análisis se centra en los indicadores de encadenamientos directos, se puede emplear la clasificación propuesta por Schuschny (2005), quien distingue entre sectores de destino intermedio y de destino final. Los primeros serán aquellos que muestren un alto índice ponderado de encadenamientos hacia adelante $\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{d}) > 1$ porque son los principales proveedores de insumos para el sistema. Los sectores de destino final serán aquellos cuyos encadenamientos hacia adelante son bajos $\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{d}) < 1$. Según esta concepción de los encadenamientos, los sectores de destino intermedio son aquellos que destinan la mayor parte de su producción a la utilización intermedia. En cambio, los sectores de destino final son aquellos que asignan la mayor parte de su producción a la demanda final, es decir, no abastecen de insumos al sistema, sino que lo abastecen de productos finales. A continuación presento las categorías de análisis (tabla 5.1) y su interpretación (tabla 5.2).

Más adelante se observa que la clasificación de los encadenamientos directos difiere respecto de la que corresponde a los encadenamientos totales. Precisamente, en el segundo caso se incluyen las interacciones interindustriales que tienen lugar de forma indirecta. Por esta razón, esas interacciones están en capacidad de potenciar los encadenamientos hacia adelante y/o hacia atrás, o incluso contrarrestarlos respecto de los encadenamientos que se observan de manera directa.

Homogeneidad y heterogeneidad en los encadenamientos directos y totales

Homogeneidad en los coeficientes técnicos y en la distribución

Un indicador de la dispersión de los efectos del consumo energético de cada actividad en el resto de los sectores del sistema económico será el vector de los coeficientes de variación de la matriz de coeficientes técnicos **A**, en el análisis desde la demanda, que denominaré $\mathbf{cv^A}$, y el vector de coeficientes de variación de la matriz de distribución **B**, en el enfoque de la oferta, que notaré como $\mathbf{cv^B}$. Este análisis ha sido propuesto por Guitton (1957) para definir los sectores clave debido al grado de dispersión de sus efectos en el resto de las actividades del sistema. Se interpreta que la actividad **j**-ésima puede afectar de manera uniforme a todas las actividades (con un bajo coeficiente de variación) cuando existe homogeneidad. Asimismo, el efecto de esta actividad podría hallarse concentrado en unos

Tabla 5.1. Clasificación intersectorial por encadenamientos directos

Clasificación de sectores por encadenamientos directos		Hacia adelante	
		Bajos $\bar{f}(d)_i < 1$	Altos $\bar{f}(d)_i > 1$
Hacia atrás	Bajos $\bar{b}(d)_j < 1$	NM, DF	NM, DI
	Altos $\bar{b}(d)_j > 1$	M, DF	M, DI

Fuente: adaptación de Schuschny (2005).

Nota: (NM) sectores no manufactureros; (M) sectores manufactureros; (DF) sectores de destino final, y (DI) sectores de consumo intermedio.

Tabla 5.2. Interpretación de los encadenamientos directos

Sectores no manufactureros de destino final Estos sectores mantienen bajos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, por lo que no constituyen significativos proveedores ni consumidores de insumos para el resto del sistema.	**Sectores no manufactureros de destino intermedio** Son sectores de baja demanda de insumos, cuya producción se destina principalmente a la utilización intermedia, puesto que muestran altos encadenamientos hacia adelante. Otra forma de identificarlos sería como productores primarios (como en la cadena trófica) de bienes intermedios.
Sectores manufactureros de destino final Estos sectores son los principales consumidores de productos intermedios del sistema y destinan su producción a la demanda final porque no se identifican con los principales proveedores de insumos para el sistema, debido a sus bajos encadenamientos hacia adelante.	**Sectores manufactureros de destino intermedio** Son sectores con altos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, por lo que consumen y a la vez proveen gran cantidad de insumos a los demás sectores; en consecuencia, pueden promover un incremento en la demanda final. Estos sectores procesan gran cantidad de insumos y su producción se destina al uso intermedio, en ese contexto, potencian rondas posteriores de transacciones intersectoriales.

Fuente: Boundi Chakri (2016) y Schuschny (2005).

pocos sectores y, por ende, en ese caso mostrará una alta dispersión (un alto coeficiente de variación) y se dirá que existe heterogeneidad.

Los coeficientes de variación se expresan por el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética de una variable. En otros términos, **cv** expresa el grado de variabilidad como porcentaje del promedio. Por ello, se interpreta que a mayor **cv** los datos son más heterogéneos, por lo tanto, su media aritmética es menos representativa del conjunto de datos. Por el contrario, un menor **cv** indica mayor homogeneidad de los datos, por lo tanto, mayor representatividad del conjunto de datos a partir del promedio. Algunas variantes pueden tener lugar en el cálculo del numerador según se trate de un cómputo para la población total o para una muestra de la población. A continuación, presento las formulaciones de coeficientes de variación para las matrices de coeficientes técnicos y de distribución, respectivamente:

$$cv_j^A \begin{cases} 0 & \text{si } \mu_j^A = 0 \\ \dfrac{\sigma_j^A}{\mu_j^A} & \text{si } \mu_j^A \neq 0 \end{cases}$$

$$cv_i^B \begin{cases} 0 & \text{si } \mu_i^B = 0 \\ \dfrac{\sigma_i^B}{\mu_i^B} & \text{si } \mu_i^B \neq 0 \end{cases}$$

Donde:

$$\frac{\sigma_j^A}{\mu_j^A} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(a_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_{ij})^2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_{ij}}$$

$$\frac{\sigma_i^B}{\mu_i^B} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(b_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}b_{ij})^2}}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}b_{ij}}$$

Homogeneidad en las matrices inversas de Leontief y de Ghosh

A los indicadores de dispersión anteriores propongo agregar los indicadores correspondientes para el caso de los efectos totales tanto directos como indirectos del consumo energético, es decir, respecto de las matrices inversas de Leontief **L** y de Ghosh **G**. Estos indicadores se interpretan exactamente igual que los previos, con la única diferencia de que en este caso se abarcan tanto efectos directos como indirectos.

$$cv_j^L \begin{cases} 0 & \text{si } \mu_j^L = 0 \\ \dfrac{\sigma_j^L}{\mu_j^L} & \text{si } \mu_j^L \neq 0 \end{cases}$$

$$cv_i^G \begin{cases} 0 & \text{si } \mu_i^G = 0 \\ \dfrac{\sigma_i^G}{\mu_i^G} & \text{si } \mu_i^G \neq 0 \end{cases}$$

Donde:

$$\frac{\sigma_j^L}{\mu_j^L} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(l_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_{ij}\right)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_{ij}}$$

$$\frac{\sigma_i^G}{\mu_i^G} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(g_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} g_{ij}\right)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} g_{ij}}$$

De esta forma, clasifico a los sectores económicos en cuatro categorías de análisis (tabla 5.3).

1. Son sectores clave aquellos que muestran importantes encadenamientos hacia adelante y hacia atrás en el proceso de intercambios económicos o, en otras palabras, su demanda y oferta de insumos es considerable dentro del sistema. Una forma alternativa de identificar estos sectores es como dependientes respecto de la oferta (y/o la demanda intersectorial) o conectados con la oferta (y/o la demanda intersectorial) (Miller y Blair 2009). Para este análisis empleo los indicadores normalizados, por lo que designo como importantes a aquellos encadenamientos que muestran valores superiores a la unidad.
2. Son impulsores de la oferta aquellos sectores que muestran altos encadenamientos hacia adelante o, en otros términos, son los más significativos oferentes de insumos del sistema. En otras clasificaciones suelen denominarse "sectores base" (BCE 2019), porque de ellos depende la provisión de insumos con que cuenta el sistema económico. Miller y Blair (2009) proponen identificar a estos sectores como dependientes de la demanda intersectorial porque al ser los mayores oferentes del sistema, su funcionamiento se supedita a la evolución de la demanda.
3. Son impulsores de la demanda aquellos sectores que exhiben altos encadenamientos hacia atrás, es decir, son los principales consumidores de insumos del sistema. En

otras clasificaciones en esta categoría se ubican a los denominados "sectores motor" (BCE 2019), porque a partir de su demanda de insumos movilizan la actividad económica en los demás sectores. En cambio, Miller y Blair (2009) identifican a estos sectores como dependientes de la oferta intersectorial porque, al aglutinar la mayor parte de la demanda de insumos, su provisión queda a expensas del comportamiento de la oferta.

4. Son sectores independientes aquellos que no presentan encadenamientos significativos hacia adelante ni hacia atrás. Esto significa que se trata de sectores con oferta y demanda de insumos poco representativas dentro del sistema, por lo tanto, muestran débiles conexiones con los demás sectores.

Dentro de cada una de estas categorías pueden, además, distinguirse sectores homogéneos, heterogéneos y otros que solamente son homogéneos (o heterogéneos) en la oferta o en la demanda. Es importante la intersección entre los distintos tipos de encadenamientos y la homogeneidad porque pueden potenciarse condiciones de estabilidad o de retroalimentación de los encadenamientos.

1. Son homogéneos aquellos sectores que se identifican con un bajo coeficiente de variación en ambas matrices de coeficientes técnicos, es decir, se pueden interpretar como homogéneos tanto en la oferta como en la demanda. Los sectores en esta categoría son aquellos que afectan de manera uniforme a todas las actividades tanto desde una

Tabla 5.3. Clasificación sectorial según los tipos de encadenamientos y la homogeneidad en los coeficientes técnicos

Clasificación de sectores		Encadenamientos directos o totales hacia adelante					
		Bajos $\bar{f}(d)_i < 1$		Altos $\bar{f}(d)_i > 1$			
Encadenamientos directos o totales hacia atrás	Bajos $\bar{b}(d)_j < 1$	**Ind** Hom	**Ind** HeO	**IO** Hom	**IO** HeO	Baja $cv_i^A < Me(cv^A)$	Homogéneos en demanda
		Ind HeD	**Ind** Het	**IO** HoO	**IO** Het	Alta $cv_i^A > Me(cv^A)$	Heterogéneos en demanda
	Altos $\bar{b}(d)_j > 1$	**ID** Hom	**ID** HoD	**Clave** Hom	**Clave** HeO	Baja $cv_i^A < Me(cv^A)$	Homogéneos en demanda
		ID HeD	**ID** Het	**Clave** HeD	**Clave** Het	Alta $cv_i^A > Me(cv^A)$	Heterogéneos en demanda
		Baja $cv_i^B < Me(cv^B)$	Alta $cv_i^B > Me(cv^B)$	Baja $cv_i^B < Me(cv^B)$	Alta $cv_i^B > Me(cv^B)$		
		Homogéneos en oferta	Heterogéneos en oferta	Homogéneos en oferta	Heterogéneos en oferta		

Nota: (Me) mediana; (Ind) independientes; (IO) impulsores de oferta; (ID) impulsores de demanda; (Hom) homogéneos en la oferta y en la demanda; (Het) heterogéneos en la oferta y en la demanda; (HoD) homogéneos en la demanda; (HoO) homogéneos en la oferta; (HeD) heterogéneos en la demanda, y (HeO) heterogéneos en la oferta.

perspectiva de oferta como de demanda. El coeficiente de variación mide el grado de dispersión en los intercambios técnicos intersectoriales y se definirá como bajo si es inferior al valor mediano del vector de coeficientes de variación intersectoriales de la matriz de coeficientes técnicos correspondiente.

2. Son heterogéneos aquellos sectores que muestran una alta dispersión en ambas matrices de coeficientes técnicos, es decir, son heterogéneos tanto en la oferta como en la demanda. Se interpretan como heterogéneos aquellos sectores cuyos efectos se hallan concentrados en unas pocas actividades tanto desde una perspectiva de oferta como de demanda. En este caso, los sectores heterogéneos mostrarán un alto grado de dispersión, con coeficientes de variación superiores a la mediana del vector de coeficientes de variación intersectoriales.
3. Son homogéneos en la demanda aquellos sectores que exhiben baja dispersión en contraste con la mediana del vector de coeficientes de variación de la matriz de coeficientes técnicos construida desde un enfoque de demanda, **A**. A su vez, los sectores en esta categoría se definirán como heterogéneos en la oferta. Es decir, los sectores en esta categoría combinan un efecto uniforme en todas las actividades de demanda y un efecto que se distribuye de forma desigual en las de oferta.
4. Son homogéneos en la oferta aquellos sectores que presentan baja dispersión en contraste con la mediana del vector de coeficientes de variación de la matriz de coeficientes técnicos de la oferta, **B**. A su vez, los sectores en esta categoría se definirán como heterogéneos en la demanda. Es decir, los sectores en esta categoría combinan un efecto que se distribuye de manera uniforme entre las actividades de provisión de insumos, pero al mismo tiempo dicho efecto se halla concentrado en unas pocas actividades de demanda.

En la tabla 5.4 describo la intersección entre los diferentes tipos de encadenamientos y el grado de homogeneidad que los caracteriza.

Indicadores de encadenamientos desde el enfoque de la energía primaria incorporada

Desde el debate sobre el empleo de matrices insumo-producto en unidades físicas, en la literatura se ha argumentado que los resultados de la aplicación de los métodos de precios implícitos carecen de consistencia en el cumplimiento del principio termodinámico de conservación. He explicado y demostrado en los capítulos previos que la inconsistencia entre estos métodos descansa más bien en su interpretación y en la ausencia de una aplicación de métodos de balanceo. En esta línea argumental, considero que no necesariamente los cálculos de intercambios de insumos y productos energéticos será estructuralmente análoga a la base económica que los origina cuando se aplica un procedimiento como el método de energía primaria incorporada. Por el contrario, argumento que este método guarda una importante particularidad al originarse no solo en la matriz insumo-producto económica, sino que la combina con una matriz física que muestra los intercambios

Tabla 5.4. Descripción de sectores según tipos de encadenamientos y grados de homogeneidad

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Independientes
Bajos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás en sectores marginados del control de la oferta y la demanda de insumos. En estas condiciones, una distribución concentrada o uniforme en la oferta o en la demanda de insumos resulta ser neutral.</td><td colspan="2">Impulsores de oferta
Altos encadenamientos hacia adelante promueven sectores que concentran la oferta de insumos en un contexto de dependencia respecto de la demanda que se busca abastecer.</td></tr>
<tr><td>Heterogéneos en la oferta
Estos sectores movilizan la oferta de insumos en un efecto que se halla concentrado en pocas actividades. Su mayor riesgo está asociado a la dependencia respecto de una demanda de insumos distribuida uniformemente, que puede habilitar un exceso de oferta en determinados sectores o escasez de oferta en otros</td><td>Homogéneos
Estos sectores movilizan la oferta de insumos en un efecto que se distribuye, de manera uniforme, entre todas las actividades tanto de oferta como de demanda. Por esta razón, existe poco riesgo de sobreabundancia en la oferta de insumos.</td></tr>
<tr><td>Heterogéneos
Estos sectores movilizan la oferta de insumos en un efecto que se halla concentrado en un pequeño grupo de actividades. Puesto que esa oferta depende de una demanda también concentrada, existe riesgo de un exceso de oferta o de demanda en determinados sectores.</td><td>Homogéneos en la oferta
Estos sectores movilizan la oferta de insumos en un efecto que se halla distribuido, de manera uniforme, entre todos los proveedores. Existe un riesgo menor de saturar el mercado porque la demanda está concentrada en pocas actividades.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Impulsores de demanda
Altos encadenamientos hacia atrás o alta demanda de insumos, por lo tanto, son sectores dependientes de la oferta para abastecer su provisión.</td><td colspan="2">Sectores clave
Altos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, son los principales proveedores y consumidores de insumos y por lo tanto, son sectores dependientes de la oferta y la demanda de insumos</td></tr>
<tr><td>Homogéneos en la demanda
Estas actividades movilizan la demanda de insumos en un efecto que se halla distribuido, de manera uniforme, entre todos los consumidores. Existe un riesgo moderado de desequilibrios en la oferta de insumos porque la provisión está concentrada en pocos sectores.</td><td>Homogéneos
Estos sectores movilizan la demanda de insumos, en un efecto que se distribuye, de manera uniforme, entre todas las actividades de consumo. Por esta razón, existe bajo riesgo de desabastecimiento de la demanda de insumos.</td><td>Heterogéneos en la oferta
Estos sectores movilizan tanto la oferta como la demanda. No obstante, concentran sus efectos en pocas actividades de provisión de insumos, pero dependen de una demanda que se halla distribuida de manera uniforme entre todos los sectores. Así, pueden existir excesos de oferta de ciertos insumos.</td><td>Homogéneos
Estos sectores movilizan tanto la oferta como la demanda de insumos en un efecto que se distribuye, de manera uniforme, entre todas las actividades. Por esta razón, no se identifican riesgos por exceder la provisión de insumos ni desabastecimiento en el consumo.</td></tr>
<tr><td>Heterogéneos
Son sectores que movilizan la demanda de insumos, de manera concentrada, en unas pocas actividades, cuya provisión puede hallarse en riesgo porque la oferta de insumos también está concentrada en un pequeño grupo de sectores.</td><td>Heterogéneos en la demanda
Estas actividades movilizan la demanda de insumos en un efecto que se halla concentrado en un grupo de actividades. Existe riesgo significativo de escasez de insumos en estos sectores porque dependen de una oferta que está distribuida uniformemente.</td><td>Heterogéneos
Aunque estos sectores movilizan tanto la oferta como la demanda de insumos, sus efectos se hallan concentrados en pocas actividades, por lo que existe riesgo de un exceso de oferta o de demanda de insumos.</td><td>Heterogéneos en la demanda
Estos sectores movilizan tanto la oferta como la demanda. No obstante, concentran sus efectos en pocas actividades que demandan insumos, pero dependen de una oferta que se halla distribuida uniformemente. En estas condiciones, existe un riesgo moderado de escasez de algunos insumos.</td></tr>
</table>

sectoriales de energía durante el proceso de transformación. Arguyo que esta mixtura de la información económica y energética permite estructurar una lectura adecuada de los intercambios energéticos, que supera las dificultades del esquema de precios implícitos, cuyos resultados energéticos son por construcción fracciones o múltiplos de las tablas de intercambio económico.

El consumo de energía

Para analizar la estructura de los encadenamientos productivos del sistema económico, adapto indicadores y la clasificación propuesta por Alcántara (2007) para estudiar los encadenamientos en el caso del sector energético que detallo en esta sección. La ventaja de esta adaptación es que permite contrastar los resultados de la estructura económica con los de la estructura energética de los encadenamientos productivos. Para ello, agrego indicadores de homogeneidad en la demanda y en la oferta a partir de los niveles de dispersión en las matrices de relaciones técnicas interindustriales, es decir, tomo los coeficientes de variación que corresponden a las matrices **A** y **B** en el caso de los efectos directos, o **L** y **G** en el caso de los efectos totales. En otras palabras, combino la información económica anterior con los datos energéticos para estimar los encadenamientos productivos de la energía.

Consumo energético de cada industria, e^p

Se obtiene a partir de la matriz de consumo interindustrial de energía $\mathbf{E}^p = \hat{\mathbf{f}}^{PA}\mathbf{B}^A$ que derivo al desarrollar el modelo de energía incorporada basado en el trabajo de Alcántara y Roca (1995). Hay que recordar que esta matriz muestra la distribución del consumo final de energía para **m** sectores energéticos, un sector no energético y su respectiva asignación entre **n** sectores económicos. El vector de consumo energético de cada industria se definirá en unidades de energía así:

$$(\mathbf{e}^p)' = \mathbf{1}'_{(m+1)\times n}\mathbf{E}^p$$

En donde $(\mathbf{e}^p)'$, cuya dimensión es $\mathbf{1} \times \mathbf{n}$, muestra el consumo de energía de cada industria para todos los tipos de sectores energéticos y no energéticos.[4]

Consumo energético relativo por sectores, er^p

A partir del procedimiento que desarrolla Alcántara (2007) y que aplica Buenaño (2017), en ambos casos para las emisiones de CO_2, desarrollo una variante para estudiar el consumo de energía, que permite precisar las definiciones de efectos totales y directos del

[4] Se podrá usar también la transpuesta de esta definición, es decir, $\mathbf{e}^p = (\mathbf{E}^p)'\ \mathbf{1}_{(m+1)\times n}$. Hay que recordar que para dos matrices **B** y **C** que son multiplicables, tales que A = B·C la transpuesta de su producto será A' = C'·B'.

consumo energético. De esta forma, calculo el consumo relativo sectorial de energía, que se define en relación con la producción económica como $\mathbf{er}^P$:

$$(\mathbf{er}^P)' = (\mathbf{e}^P)' \cdot (\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

Así, $(\mathbf{er}^P)'$ constituye un vector fila para medir el consumo de energía en términos relativos a la producción total, por lo tanto, se expresará como intensidad energética del consumo, por ejemplo, en bep/$.

Consumo energético agregado, γ

La agregación del consumo energético de cada industria se expresa así:

$$\gamma = (\mathbf{er}^P)'\mathbf{x}$$

Donde γ es un escalar que indica el consumo total de energía del sistema y se halla medido en unidades energéticas y en términos absolutos. Asimismo, hay que notar que se podrá calcular el consumo de energía agregado del sistema por la suma de los elementos del vector de consumo de energía de cada industria de la siguiente forma:

$$\gamma = (\mathbf{e}^P)'\mathbf{1}_n.$$

El siguiente paso es buscar la distribución interindustrial del consumo energético, pues hasta ahora se conoce el consumo que realizan **n** sectores del sistema económico mas no los intercambios energéticos entre estos. En otros términos, se busca la matriz de dimensión **n** x **n** del consumo energético (que denomino más adelante $\mathbf{E}^{Pt}$) que explique la distribución de los intercambios descritos inicialmente entre (**m+1**) x **n** sectores económicos a partir de la matriz $\mathbf{E}^P$. La ventaja de esta descripción es que permitirá, además, distinguir entre el consumo directo y el consumo total (directo e indirecto) de energía.

Consumo total de energía de cada industria, directo e indirecto, e^{Pt}

Otra forma de expresar el consumo energético de cada industria $\mathbf{e}^P$ es a través del coeficiente de consumo relativo $\widehat{\mathbf{er}^P}$ tal que:

$$\mathbf{e}^P = \widehat{\mathbf{er}^P} \cdot \mathbf{x}$$

Esta última definición es útil para derivar el consumo energético total, que se descompone en el efecto directo e indirecto del consumo al aplicar las ecuaciones de base del modelo de Leontief, en particular $\mathbf{x} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}$. Para ello, reemplazo **x**:

$$\mathbf{e}^{Pt} = \widehat{\mathbf{er}^P}\,(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\,\mathbf{f}$$

Es decir, esta última expresión se puede interpretar como el consumo directo e indirecto de energía de cada industria porque se expresa en términos de la inversa de Leontief **L: $\mathbf{e}^{Pt} = \widehat{\mathbf{er}^{P}}\ \mathbf{Lf}$,** la cual se mide en unidades absolutas de energía. Debe notarse que el vector $\mathbf{e}^{Pt}$ coincide con el vector de consumo energético $\mathbf{e}^{P}$ que uso como punto de partida. Ahora lo noto como $\mathbf{e}^{Pt}$ porque busco destacar que esta nueva definición incorpora los efectos totales, tanto directos como indirectos, al basarse en la inversa de Leontief. Además, esta forma de expresar este vector de consumo energético es útil para diferenciar entre el consumo total y el consumo directo, que explico a continuación.

Consumo energético directo de cada industria, e^{Pd}

Propongo aislar el consumo energético directo a partir de la matriz de coeficientes técnicos **A**, que otorga el efecto inicial de un cambio en la demanda final en términos de consumo energético. Así, se define el vector $\mathbf{e}^{Pd}$, de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$, el cual se mide en unidades absolutas de energía y proviene de reemplazar la matriz inversa de Leontief **L** por **A**, en la última ecuación, de la siguiente forma:

$$\mathbf{e}^{Pd} = \widehat{\mathbf{er}^{P}}\ \mathbf{A}\ \mathbf{f}$$

Consumo energético interindustrial total, directo e indirecto, E^{Pt}

Alcántara (2007) también propone explicar el consumo total de energía sectorial, que incluye los efectos directos e indirectos, a partir del modelo básico de Leontief. Esta definición tiene sentido porque permite identificar el intercambio intersectorial de energía en una dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$, mucho más amplia que la matriz inicial $\mathbf{E}^{P}$ que consideré al inicio de esta sección, la cual se define para $(\mathbf{m} + \mathbf{1}) \times \mathbf{n}$ elementos. Se puede disponer de esta información en dos niveles: uno interindustrial y otro agregado. La matriz de consumo energético interindustrial directo e indirecto se expresa desde la matriz diagonal de la demanda final $\hat{\mathbf{f}}$ como $\mathbf{E}^{Pt}$ de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$ así:

$$\mathbf{E}^{Pt} = \widehat{\mathbf{er}^{P}}\ (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\ \hat{\mathbf{f}}$$

Otra formulación será

$$\mathbf{E}^{Pt} = \mathbf{Y}_f \hat{\mathbf{f}}$$

Donde $\mathbf{Y}_f = \widehat{\mathbf{er}^{P}}\ (\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$. El monto agregado de consumo directo e indirecto de energía de cada sector se expresa como un vector columna de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$ conformado por la suma de las filas de la matriz $\mathbf{E}^{Pt}$ así:

$$\mathbf{e}^{Pt} = \mathbf{Y}_f \hat{\mathbf{f}}\, \mathbf{1}_n = \mathbf{E}^{Pt}\, \mathbf{1}_n$$

Se puede notar que el vector $\mathbf{e}^{Pt}$ es el mismo que el vector de consumo que usé al inicio, $\mathbf{e}^{P}$, con la diferencia de que ambos se derivan de matrices distintas tanto en su tamaño como en su composición.

Consumo energético interindustrial directo, E^{Pd}

Planteo aislar el consumo energético interindustrial directo al reemplazar la matriz inversa de Leontief por la de coeficientes técnicos en las definiciones anteriores:

$$\mathbf{E}^{Pd} = \widehat{\mathbf{er}^{P}}\,\mathbf{A}\,\hat{\mathbf{f}}$$

$$\mathbf{e}^{Pd} = \widehat{\mathbf{er}^{P}}\mathbf{A}\,\hat{\mathbf{f}}\,\mathbf{1}_n = \mathbf{E}^{Pd}\,\mathbf{1}_n$$

Consumo energético interindustrial ponderado, directo e indirecto, $\tilde{E}^{Pt}$

Para evitar sesgos en la interpretación de los multiplicadores de demanda, se introducen las ponderaciones de la demanda $\tilde{f}$ que se definen así:

$$\tilde{\mathbf{f}} = \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{1}'_n\mathbf{f}}$$

Al ser ponderadores, se cumplirá para estos factores que $\mathbf{1}'_n\tilde{\mathbf{f}} = \sum_i \tilde{\mathbf{f}}_i = \mathbf{1}$.

El consumo energético intersectorial ponderado desde una perspectiva de demanda se definirá mediante el factor de normalización del consumo final $\tilde{f}$ que reemplaza a su valor absoluto **f**. Para ello, modifico la ecuación de consumo intersectorial directo e indirecto de energía $\mathbf{E}^{Pt} = \mathbf{Y}_f\,\hat{\mathbf{f}}$ como expongo a continuación:

$$\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}\,(\mathbf{dem}) = \mathbf{Y}_f\hat{\tilde{\mathbf{f}}} = \widehat{\mathbf{er}^{P}}(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\hat{\tilde{\mathbf{f}}}$$

El acento ˜ en la matriz ponderada de consumo energético intersectorial $\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}$ y en la matriz diagonal del consumo final ponderado $\hat{\tilde{\mathbf{f}}}$ permite identificar que se trata de resultados normalizados. Aquí se destaca que la matriz proviene de un enfoque de demanda (**dem**), donde se emplea al vector de demanda **f** y a la matriz de coeficientes técnicos **A**, dado que más adelante se obtendrá su análogo para el caso del enfoque de oferta (**ofer**).

Cabe notar que $\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}$ desde el enfoque de demanda se mide en unidades de energía relativas a la demanda final (bep/$) mientras que su similar sin normalizar $\mathbf{E}^{Pt}$, se valora en unidades de energía absolutas (bep). Es una especie de equivalente a la matriz de coeficientes técnicos **A** en el modelo de Leontief. Así, el vector de consumo energético total (directo e indirecto) ponderado por industria, $\tilde{\mathbf{e}}^{Pt}$, se podrá computar así:

$$\tilde{\mathbf{e}}^{Pt}\,(\mathbf{dem}) = \mathbf{Y}_f\hat{\tilde{\mathbf{f}}}\,\mathbf{1}_n = \tilde{\mathbf{E}}^{Pt}\,\mathbf{1}_n$$

El valor promedio del consumo energético total ponderado por industria desde el enfoque de demanda se obtendrá así:

$$\bar{\varepsilon}_f = \frac{1'_n \tilde{\mathbf{e}}^{Pt}(\mathbf{dem})}{\mathbf{n}}$$

En donde $\bar{\varepsilon}_f$ es un escalar.

Similarmente, se procede con el enfoque de oferta en donde se pueden obtener matrices análogas al reemplazar al vector de demanda **f** por el vector de valor agregado **v**, y a la matriz de coeficientes técnicos **A** por la matriz de distribución **B** (más adelante detallo la deducción de este resultado en el contexto de los encadenamientos energéticos). Asimismo, se requiere definir a los multiplicadores de la oferta y se introducen las ponderaciones de la oferta sectorial $\tilde{v}$ que se definen como el vector

$$\tilde{v} = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{1'_n v}}$$

Al ser ponderadores, se cumplirá para estos factores que $\mathbf{1'_n}\tilde{v} = \sum_j \tilde{v}_j = \mathbf{1}$.

Así, el consumo energético interindustrial ponderado desde una perspectiva de oferta se obtendrá al emplear el factor de normalización del valor agregado $\tilde{v}$ en lugar de su valor absoluto **v**. Para ello, se modifica la ecuación de consumo energético interindustrial, tanto directo como indirecto, $\mathbf{E^{Pt}(ofer) = \hat{v} Y_v = \hat{v}(I_n - B)^{-1}\widehat{er^P}}$ de la siguiente forma:[5]

$$\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}(\mathbf{ofer}) = \hat{\tilde{\mathbf{v}}}\mathbf{Y_v} = \hat{\tilde{\mathbf{v}}}(\mathbf{I_n - B})^{-1}\widehat{\mathbf{er}^P}$$

Donde reitero que se ha reemplazado a $\hat{\mathbf{f}}$ por $\hat{\mathbf{v}}$ y donde $\mathbf{Y_v} = (\mathbf{I_n - B})^{-1}\widehat{\mathbf{er}^P}$. Hay que notar que, en el enfoque de la oferta, las multiplicaciones matriciales cambian de orden con respecto a las multiplicaciones aplicadas en el enfoque de la demanda (cabe recordar, por ejemplo, que el vector **v** premultiplica a la matriz inversa de Ghosh, a diferencia del vector **f** que pos-multiplica a la matriz inversa de Leontief).

En esta ocasión, dentro del enfoque de oferta, noto con acento tanto la matriz de consumo energético total normalizada $\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}$ como la matriz diagonal de la ponderación del valor agregado $\hat{\tilde{\mathbf{v}}}$. Es importante aclarar que $\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}$ a diferencia de $\mathbf{E}^{Pt}$, desde el enfoque de oferta, no se encuentra medida en términos absolutos, es decir en unidades de energía (bep). $\tilde{\mathbf{E}}^{Pt}$ se contabiliza en unidades relativas a la producción total (bep/$). Se trata de una matriz similar a la de coeficientes de distribución **B** del modelo de Ghosh. Con esto, el consumo total de energía sectorial ponderado o normalizado, que incluye los efectos directos e indirectos, se podrá calcular así:

$$(\tilde{\mathbf{e}}^{Pt})'(\mathbf{ofer}) = \mathbf{1'_n}\hat{\tilde{\mathbf{v}}}\mathbf{Y_v}$$

[5] Cabe recordar que en el enfoque de la oferta se cumple que $\mathbf{x'=v'(I_n-B)^{-1}}$. Además, hay que notar que $\hat{\mathbf{v}}$ es una matriz diagonal cuya estructura no cambia sea que se construya a partir de **v** o **v'**, es decir, $\hat{\mathbf{v}}'=\hat{\mathbf{v}}$.

El valor promedio del consumo energético total ponderado desde el enfoque de oferta se obtendrá a partir del vector fila de la última expresión así:

$$\bar{\varepsilon}_v = \frac{(\tilde{\mathbf{e}}^{Pt})'(\mathbf{ofer})\mathbf{1}_n}{n}$$

Donde $\bar{\varepsilon}_v$ es un escalar y donde se puede verificar que $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_f = \bar{\varepsilon}_v$, es decir, se obtiene el mismo promedio sea que se mida por el enfoque de la demanda o de la oferta.

Encadenamientos energéticos

Encadenamientos hacia atrás

A partir del vector $\mathbf{e}^{Pt}$ se puede calcular el efecto de un incremento en la demanda final en términos de consumo energético. Notaré como $\mathbf{Y}_f$ a la matriz, de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$, que se identifica como un operador lineal que permite aislar este efecto (Alcántara 2007), es decir:

$$\mathbf{e}^{Pt} = \mathbf{Y}_f\,\mathbf{f}$$

Donde:

$$\mathbf{Y}_f = \widehat{\mathbf{er}^P}\,(\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}$$

De la matriz $\mathbf{Y}_f$ se puede calcular por la sumatoria de cada columna los encadenamientos hacia atrás así:

$$\mathbf{b}'_f = \mathbf{1}'_n\,\mathbf{Y}_f$$

En donde $\mathbf{b}'_f$ es un vector fila de dimensión $\mathbf{1} \times \mathbf{n}$ que expresa el consumo relativo de energía tanto directo como indirecto. Es un indicador relativo a cada unidad de consumo final y se mide como intensidad energética en bep/$. En términos de Alcántara (2007), se trata de un efecto multiplicador en el consumo de energía que es impulsado por la expansión de las distintas demandas. En otras palabras, $\mathbf{b}'_f$ se interpreta como el potencial de consumo total de los distintos sectores o intensidad total (directa e indirecta) del consumo sectorial.

Encadenamientos hacia adelante

Una forma de medir los encadenamientos hacia adelante puede ser a través de la siguiente expresión:

$$\mathbf{f}^*_f = \mathbf{Y}_f\,\mathbf{1}_n$$

En donde $\mathbf{f}^*_f$ es un vector de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$ que corresponde a la sumatoria de las columnas de la matriz $\mathbf{Y}_f$, $\mathbf{f}^*_f$ se expresa como un indicador relativo a cada unidad de consumo final y se mide como la intensidad energética, en bep/$. Esta expresión, sin embargo, puede mostrar ciertas inconsistencias a la hora de explicar la importancia de los distintos sectores productivos desde una perspectiva de oferta.[6]

Se registran menos sesgos en la estimación de los encadenamientos hacia adelante cuando se aplican los multiplicadores de oferta que se construyen con base en la inversa de Ghosh (1958). Tal como en el caso de los encadenamientos desde la perspectiva de la demanda, desde este enfoque se combina la ecuación básica del modelo de Ghosh, $\mathbf{x}' = \mathbf{v}' (\mathbf{I}_n - \mathbf{B})^{-1}$, con la ecuación de consumo energético por industria, $\mathbf{e}^P = \widehat{\mathbf{er}^P}\,\mathbf{x}$, de la siguiente forma:[7]

$$(\mathbf{e}^P)' = \mathbf{x}'\,\widehat{\mathbf{er}^P}$$

En donde el consumo total de energía de cada industria, directo e indirecto, desde el enfoque de oferta será:

$$(\mathbf{e}^{Pt})' = \mathbf{v}'(\mathbf{I}_n - \mathbf{B})^{-1}\,\widehat{\mathbf{er}^P}$$

Como ocurría en el enfoque de la demanda, se construye un operador lineal que transforma valores añadidos o sus incrementos en consumo energético, que notaré como $\mathbf{Y}_v$ así:

$$\mathbf{Y}_v = (\mathbf{I}_n - \mathbf{B})^{-1}\,\widehat{\mathbf{er}^P}$$

Entonces, se podrá expresar el consumo total de energía de cada industria, directo e indirecto, así:

$$(\mathbf{e}^{Pt})' = \mathbf{v}'\mathbf{Y}_v$$

De aquí, el consumo de energía sectorial, tanto directo como indirecto puede analizarse tanto desde cifras desagregadas por los intercambios interindustriales como desde datos agregados. El primero corresponde a la matriz $\mathbf{E}^{Pt}$ de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$, y, el segundo, al vector $(\mathbf{e}^{Pt})'$. En términos del modelo de Ghosh, estos conceptos se expresan de la siguiente forma:

$$\mathbf{E}^{Pt} = \hat{\mathbf{v}}\,\mathbf{Y}_v$$

$$(\mathbf{e}^{Pt})' = \mathbf{1}'_n\,\hat{\mathbf{v}}\,\mathbf{Y}_v = \mathbf{1}'_n\mathbf{E}^{Pt}$$

De la matriz $\mathbf{Y}_v$ se calculan los encadenamientos hacia adelante por medio de la sumatoria de sus filas, es decir, como $\mathbf{f}^*_v = \mathbf{Y}_v\,\mathbf{1}_n$, en donde $\mathbf{f}^*_v$ es un vector columna de dimensión $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$ que expresa el consumo total de energía, tanto directo como indirecto,

[6] Al respecto, se puede revisar Laumas (1976).

[7] Es preciso recordar que todas las matrices diagonales son simétricas, es decir, si **A** es una matriz diagonal, entonces, $\mathbf{A} = \mathbf{A}'$. En este caso $\widehat{\mathbf{er}^P} = \widehat{\mathbf{er}^P}'$

generado por la expansión de los insumos primarios necesarios para incrementar la oferta del sector **i**. Se trata de un conjunto de multiplicadores de consumo energético desde una perspectiva de oferta.

Encadenamientos ponderados

Para determinar la fuerza de los encadenamientos respecto del promedio se estiman los vectores **ad** y **at** que, para facilidad analítica, se definen como vectores acotados a valores no negativos.

Para los encadenamientos hacia adelante, planteo el vector auxiliar

$$\mathbf{ad}^{*} = \frac{\hat{\hat{\mathbf{v}}}\,\mathbf{Y}_{v}\mathbf{1}_{n}}{\bar{\varepsilon}}$$

De modo que los encadenamientos hacia adelante se definen así:

$$\mathbf{ad} = [\mathbf{ad}_{i}] = \begin{cases} \mathbf{ad}_{i}^{*} & \text{si } \mathbf{ad}_{i}^{*} \geq \mathbf{0} \\ 0 & \text{si } \mathbf{ad}_{i} < \mathbf{0} \end{cases}$$

Asimismo, para los encadenamientos hacia atrás, planteo el vector auxiliar:

$$\mathbf{at}^{*} = \frac{\mathbf{1}'_{n}\,\mathbf{Y}_{f}\,\hat{\hat{\mathbf{f}}}}{\bar{\varepsilon}}$$

De modo que los encadenamientos hacia atrás se definen así:

$$\mathbf{at} = [\mathbf{at}_{j}] = \begin{cases} \mathbf{at}_{j}^{*} & \textbf{si } \mathbf{at}_{j}^{*} \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \textbf{si } \mathbf{at}_{j}^{*} < \mathbf{0} \end{cases}$$

Componentes propios y puros de los encadenamientos

En la literatura se pueden ubicar otros indicadores de los encadenamientos para analizar cuestiones más específicas. Por ejemplo, aislar la dependencia hacia atrás de un sector o sus conexiones con el resto de la economía. En estos casos se argumenta la necesidad de omitir los elementos de la diagonal en las matrices **A** o **L** (Harrigan y McGilvray 1988). En ese contexto, los elementos de la diagonal se interpretan como vínculos internos o propios, y el resto de los elementos se interpretan como los enlaces con el resto del sistema productivo, que se pueden identificar como encadenamientos puros o netos de los vínculos internos que evidencia cada sector. Se puede decir que son indicadores netos porque excluyen los impactos derivados del propio sector.

Sigo esta propuesta desde las aplicaciones de Alcántara, del Río y Hernández (2010) y Buenaño (2017). La intención de esta desagregación de los encadenamientos en sus

componentes puros y propios es identificar el efecto, en mi caso en términos de consumo energético, que se origina en el propio proceso productivo o de transformación, respecto del efecto que tiene lugar de manera indirecta, a través de los procesos productivos o de transformación energética en otros sectores económicos. De esta manera, se definen estos componentes a continuación:

Desde un enfoque de demanda:

$$\mathbf{at}^{\mathbf{propio}} = [\mathbf{at}_j^{\mathbf{propio}}] = \mathbf{Y}_f^D \tilde{\mathbf{f}}$$

$$\mathbf{at}^{\mathbf{puro}} = [\mathbf{at}_j^{\mathbf{puro}}] = \widehat{\mathbf{TY}}_f \tilde{\mathbf{f}}$$

Donde $\mathbf{Y}_f^D$ es una matriz que contiene solamente los elementos de la diagonal principal de la matriz $\mathbf{Y}_f$, y donde

$$\mathbf{TY}_f = [\mathbf{TY}_{f_j}] = [\sum_{i \neq j} \mathbf{Y}_{f_{ij}}] = \mathbf{1}'_n (\mathbf{Yf} - \mathbf{Y}_f^D)$$

Hay que recordar que $\mathbf{Y}_f$ sirve como un operador lineal que "transforma" los cambios en la demanda final en cambios en el consumo de energía, por lo que esta lectura en la diagonal principal se refiere únicamente al sector bajo análisis. El componente puro se obtiene al aislar el efecto del resto de las actividades económicas. Para ello, Alcántara, del Río y Hernández (2010) proponen obtener la suma vertical de los elementos de la matriz $\mathbf{Y}_f$, solamente para el caso de los elementos $\mathbf{i \neq j}$, es decir, aquellos que se encuentran fuera de la diagonal. Esto se describe en el factor sumatorio $\sum_{i \neq j} \mathbf{Y}_{f_{ij}} = \mathbf{TY}_{f_j}$ de la última expresión. Para describir el componente puro en términos sectoriales, empleo la matriz diagonal con los elementos de $\mathbf{TY}_f$ que noto de la forma usual como $\widehat{\mathbf{TY}}_f$. Esta descripción sirve para contrastar los resultados sectoriales del componente puro y del componente propio de los encadenamientos.[8]

Desde un enfoque de oferta, los indicadores se definen de la siguiente forma:

$$\mathbf{ad}^{\mathbf{propio}} = [\mathbf{ad}_i^{\mathbf{propio}}] = \mathbf{Y}_v^D \tilde{\mathbf{v}}$$

$$\mathbf{ad}^{\mathbf{puro}} = [\mathbf{ad}_i^{\mathbf{puro}}] = \widehat{\mathbf{TY}}_v \tilde{\mathbf{v}}$$

Donde $\mathbf{Y}_v^D$ es una matriz que contiene solamente los elementos de la diagonal de la matriz $\mathbf{Y}_v$, y donde[9]

$$\mathbf{TY}_v = [\mathbf{TY}_{V_i}] = [\sum_{j \neq i} \mathbf{Y}_{v_{ij}}] = (\mathbf{Y}_v - \mathbf{Y}_v^D)\mathbf{1}_n$$

[8] Una forma alternativa de analizar el componente puro de los encadenamientos hacia atrás será a través de la matriz $(\mathbf{Y}_f - \mathbf{Y}^D{}_f) = [\mathbf{Y}_{f_{i \neq j}}]$ que aísla el efecto del resto de las actividades económicas al considerar únicamente los elementos que se hallan fuera de la diagonal principal en la matriz $\mathbf{Y}_f$. Esta matriz, por lo tanto, tendrá valores nulos en su diagonal principal. De esta manera, los efectos puros se podrían contar a través de la siguiente formulación: $\mathbf{at}^{\mathbf{puro}^*} = (\mathbf{Y}_f - \mathbf{Y}^D{}_f)\,\tilde{\mathbf{f}}$. La desventaja de esta opción es que los resultados no necesariamente son comparables con el componente propio de los encadenamientos. Por esta razón, empleo la primera formulación.

[9] En este caso, la propuesta alternativa para el componente puro desde el enfoque de oferta será $\mathbf{ad}^{\mathbf{puro}^*} = (\mathbf{Y}_v - \mathbf{Y}_v^D)\,\tilde{\mathbf{v}}$.

Encadenamientos energéticos desde el modelo de unidades híbridas

En esta sección presento una propuesta para estimar encadenamientos y otros indicadores de intercambios dentro de la matriz insumo-producto de unidades híbridas. La particularidad que caracteriza a esta matriz es la combinación de varios tipos de unidades de medida en un solo marco de análisis. En este caso combino unidades económicas con unidades energéticas.

El punto de partida para la estimación de encadenamientos hacia atrás es la matriz de coeficientes técnicos $\mathbf{A^H}$, que conserva la notación del modelo de unidades híbridas para evidenciar que es una matriz que describe unidades energéticas y también monetarias. Esta matriz se calcula en tres etapas. La primera etapa supone la estimación de los coeficientes técnicos energéticos; la segunda, a los coeficientes técnicos monetarios, y la tercera, al ensamblaje de estos resultados en una sola matriz.

En efecto, considero la matriz de transacciones del sistema de unidades híbridas, que provee información sobre los intercambios entre **n** x **n** sectores, definidos por **n = m + s** así:

$$\mathbf{Z^*_{n\times n}} = [\,\mathbf{z^*_{ij}}\,] = \begin{cases} \mathbf{z_{ij}} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector no energético} \\ \mathbf{z^P_{ij}} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

En primer lugar, calculo los coeficientes técnicos que corresponden a los componentes energéticos. La operación por desarrollar es la siguiente:

$$\mathbf{A^P} = \mathbf{Z^*}(\widehat{\mathbf{x^P}})^{-1}$$

En donde $\mathbf{x^P}$ es el vector de oferta energética, de dimensión **n x 1**, que se mide en unidades de energía. El resultado es la matriz de efectos energéticos directos $\mathbf{A^P}$ de dimensión **n** x **n**. Para el ensamblaje de $\mathbf{A^H}$, sin embargo, solamente se considera la submatriz $\mathbf{A^P_{m\times n}}$ con **m** sectores energéticos y **n** sectores en total.

En segundo lugar, calculo los coeficientes técnicos que corresponden a los componentes económicos. Se trata de la siguiente operación:

$$\mathbf{A^M} = \mathbf{Z^*}(\widehat{\mathbf{x^M}})^{-1}$$

En donde $\mathbf{x^M}$ es el vector de oferta, de dimensión **n** x **1**, que se mide en unidades económicas. El resultado es la matriz de efectos económicos directos $\mathbf{A^M}$, de dimensión **n** x **n**. Para el ensamblaje de $\mathbf{A^H}$, sin embargo, solamente se considera la submatriz $\mathbf{A^M_{s\times n}}$ con **s** sectores económicos y **n** sectores en total.

Por último, el ensamblaje de la matriz $\mathbf{A^H}$ lo realizo bajo el siguiente criterio:

$$\mathbf{A^H_{n\times n}} = [\mathbf{a^H_{ij}}] = \begin{cases} \mathbf{a^M_{ij}} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector no energético} \\ \mathbf{a^P_{ij}} & \text{si } \mathbf{i} \text{ es un sector energético} \end{cases}$$

Cada elemento de la matriz $\mathbf{A}^H$ expresa la contribución de los insumos directos a la oferta total, que se mide como porcentaje. Esta expresión de la información en términos relativos permite manejar información uniforme a partir de esta etapa del modelo de unidades híbridas.

La inversa de Leontief que empleo en este caso corresponde a la matriz $\mathbf{L}^H = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^H)^{-1}$, de dimensión **n** x **n**. A partir de estos coeficientes calcularé los encadenamientos totales hacia atrás, que incluyen tanto los efectos directos como indirectos del intercambio en el sistema y también se analizan en unidades relativas.

Desde un enfoque de oferta, empleo la propuesta de Ghosh (1958) para estimar los encadenamientos hacia adelante. En este caso se procede conforme la convención porque no existe inconsistencia en el uso de las diferentes unidades de medida que caracterizan a la matriz de intercambios $\mathbf{Z}^*$. Para ello, calculo la matriz $\mathbf{B}^H$, de dimensión **n** x **n**, que conserva la notación del método de unidades híbridas:

$$\mathbf{B}^H = (\hat{\mathbf{x}}^*)^{-1}\,\mathbf{Z}^*$$

En donde $\mathbf{x}^*$ corresponde al vector de oferta medido en unidades híbridas, cuya dimensión es **n** x **1**. La matriz $\mathbf{B}^H$ muestra los coeficientes directos de asignación o distribución.

La matriz inversa de Ghosh es útil para dimensionar los efectos totales, directos e indirectos del intercambio y se define como $\mathbf{G}^H = (\mathbf{I}_n - \mathbf{B}^H)^{-1}$.

Los encadenamientos directos hacia atrás se miden tal como he explicado anteriormente:

$$\mathbf{BL}^H(\mathbf{d})_j = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{a}_{ij}^H$$

Se interpreta como la cantidad por la cual la producción del sector **j** depende directamente de los insumos interindustriales. Otra forma de expresar los encadenamientos hacia atrás corresponde al vector $\mathbf{b}^H(\mathbf{d}) = \mathbf{1}'_n\,\mathbf{A}^H$.

Los vínculos totales se pueden cuantificar a partir de la matriz de requerimientos totales $\mathbf{L}^H$ de la siguiente forma:

$$\mathbf{BL}^H(\mathbf{t})_j = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{l}_{ij}^H$$

Esta expresión será equivalente al vector $\mathbf{b}^H(\mathbf{t}) = \mathbf{1}'_n\mathbf{L}^H$.
La versión normalizada de estos indicadores se nota con una barra superior así:

$$\bar{\mathbf{b}}^H(\mathbf{d}) = \frac{\mathbf{n}\,\mathbf{1}'_n\mathbf{A}^H}{\mathbf{1}'_n\mathbf{A}^H\mathbf{1}_n}$$

$$\bar{\mathbf{b}}^H(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{n}\,\mathbf{1}'_n\mathbf{L}^H}{\mathbf{1}'_n\mathbf{L}^H\mathbf{1}_n}$$

En donde se distinguen los encadenamientos normalizados hacia atrás directos $\bar{\mathbf{b}}(\mathbf{d})$ de los totales $\bar{\mathbf{b}}(\mathbf{t})$. El valor promedio de $\bar{\mathbf{b}}(\mathbf{d})$ es la unidad, de manera que se interpreta que

aquellos sectores con vínculos directos hacia atrás que se hallan por encima del promedio tendrán índices mayores a uno y serán más fuertes, al contrario de los que muestren índices inferiores a la unidad, que serán más débiles. Se interpreta de manera similar para $\overline{\mathbf{b}}(\mathbf{t})$.

Los indicadores de encadenamientos hacia adelante se basan en la matriz de Ghosh y son paralelos a los indicadores de encadenamientos hacia atrás que ya he descrito anteriormente. Los encadenamientos directos hacia adelante son:

$$\mathbf{FL}^{\mathrm{H}}(\mathbf{d})_{\mathrm{i}} = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathbf{b}_{\mathbf{ij}}^{\mathrm{H}}$$

O su equivalente: $\mathbf{f}^{\mathrm{H}}(\mathbf{d}) = \mathbf{B}^{\mathrm{H}}\, \mathbf{1}_{\mathrm{n}}$
Los encadenamientos totales hacia adelante son:

$$\mathbf{FL}^{\mathrm{H}}(\mathbf{t})_{\mathrm{i}} = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathbf{g}_{\mathbf{ij}}^{\mathrm{H}}$$

o su equivalente:

$$\mathbf{f}^{\mathrm{H}}(\mathbf{t}) = \mathbf{G}^{\mathrm{H}}\, \mathbf{1}_{\mathrm{n}}$$

La versión normalizada de los encadenamientos hacia adelante será:

$$\mathbf{f}^{\overline{\mathrm{H}}}(\mathbf{d}) = \frac{\mathbf{n}\, \mathbf{B}^{\mathrm{H}}\, \mathbf{1}_{\mathrm{n}}}{\mathbf{1}'_{\mathrm{n}}\, \mathbf{B}^{\mathrm{H}}\, \mathbf{1}_{\mathrm{n}}}$$

$$\mathbf{f}^{\overline{\mathrm{H}}}(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{n}\, \mathbf{G}^{\mathrm{H}}\, \mathbf{1}_{\mathrm{n}}}{\mathbf{1}'_{\mathrm{n}}\, \mathbf{G}^{\mathrm{H}} \mathbf{1}_{\mathrm{n}}}$$

Por último, explico los componentes propios y puros de los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás. En este caso, sigo un procedimiento similar al que empleo en el modelo de energía primaria incorporada. Hay que tener presente que esta vez trabajo con matrices en unidades híbridas. El primer elemento por considerar es el consumo relativo de energía, $\mathbf{e}^{\mathrm{H}} = [\mathbf{e}_{\mathrm{j}}^{\mathrm{H}}]$, que mide el consumo sectorial por cada dólar de la oferta económica. La matriz diagonal que se obtiene de este factor $\widehat{\mathbf{e}^{\mathrm{H}}}$ sería equivalente al vector $\widehat{\mathbf{er}^{\mathrm{P}}}$ que se utilizó en el método de energía incorporada.

$$\mathbf{e}^{\mathrm{H}} = [\mathbf{e}_{\mathrm{j}}^{\mathrm{H}}] = [\textstyle\sum_{\mathrm{i}} \varepsilon_{\mathbf{ij}}^{\mathrm{H}}]$$

Donde $\varepsilon_{\mathbf{ij}}^{\mathrm{H}}$ refleja el consumo energético realizado de la fuente **i** para producir un dólar en productos del sector **j**.

En el caso de los encadenamientos hacia atrás, calculo a partir de $\mathbf{e}^{\mathrm{H}}$ un operador lineal que permite aislar el efecto de un incremento en la demanda final en términos del consumo energético. Notaré como $\mathbf{Y}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{H}}$ a la matriz de dimensión **n** x **n**, que expresa este efecto:

$$\mathbf{Y}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{H}} = \widehat{\mathbf{e}^{\mathrm{H}}}\, (\mathbf{I}_{\mathrm{n}} - \mathbf{A}^{\mathrm{H}})^{-1}$$

En el caso de los encadenamientos hacia adelante, calculo a partir de $\mathbf{e}^{H}$ un operador lineal que transforma valores añadidos o sus incrementos en consumo energético, que lo notaré como $\mathbf{Y}_{v}^{H}$:

$$\mathbf{Y}_{v}^{H} = (\mathbf{I}_{n} - \mathbf{B}^{H})^{-1}\,\widehat{\mathbf{e}^{H}}$$

Desde estos operadores calcularé los componentes propios y puros de los encadenamientos hacia atrás y hacia adelante. Como se sabe, el componente propio en el caso del consumo energético explica el uso que se origina en el propio proceso productivo o de transformación; mientras que el componente puro se refiere al efecto que tiene lugar de manera indirecta, a través de los procesos que se realizan en los demás sectores.

Desde un enfoque de demanda será:

$$\mathbf{b}^{H}(\mathbf{t}^{propio}) = \mathbf{Y}_{f}^{HD}\tilde{\mathbf{f}}^{H}$$

En donde $\mathbf{Y}_{f}^{HD}$ es una matriz que contiene solamente los elementos de la diagonal de la matriz $\mathbf{Y}_{f}^{H}$, y $\tilde{\mathbf{f}}^{H}$ es un vector de ponderaciones de la demanda final, razón por la cual $\sum_{i} \tilde{f}_{i}^{H} = 1$. El vector de ponderación $\tilde{\mathbf{f}}^{H}$ se calcula en dos pasos, puesto que se conjugan al menos dos unidades de medida en la definición de la demanda final. En primer lugar, se calcula la ponderación que corresponde a cada sector energético medido en unidades energéticas; en segundo lugar, se calcula la ponderación correspondiente a los sectores económicos medidos en unidades monetarias. Esta distribución se reescala sobre la base del número de sectores que se identifican en unidades físicas y en unidades monetarias. Por ejemplo, si existen 5 sectores económicos y un total de 17 sectores en el análisis, la ponderación total de los sectores económicos corresponderá a 5/17 = 29 %. Con este factor se reescala la distribución observada entre los sectores económicos.

Ahora, los encadenamientos puros se definirán así:

$$\mathbf{b}^{H}(\mathbf{t}^{puro}) = [\mathbf{b}_{j}^{H}(\mathbf{t}^{puro})] = \widehat{\mathbf{TY}_{f}^{H}}\tilde{\mathbf{f}}^{H}$$

En donde $\mathbf{TY}_{f}^{H} = [\mathbf{TY}_{f_j}^{H}] = [\sum_{i \neq j} \mathbf{Y}_{f_{ij}}^{H}] = \mathbf{1}'_{n}(\mathbf{Y}_{f}^{H} - \mathbf{Y}_{f}^{HD})$

$\mathbf{Y}_{f}^{HD}$ representa los elementos de la diagonal principal de la matriz $\mathbf{Y}_{f}^{H}$. El componente puro, en cambio, se obtiene al aislar el efecto del resto de las actividades económicas, de allí que defino $\mathbf{TY}_{f}^{H}$ excluyendo los elementos de la diagonal.

Desde un enfoque de oferta, los componentes propios y puros de los encadenamientos serán:

$$\mathbf{f}^{H}(\mathbf{t}^{propio}) = [\mathbf{f}_{i}^{H}(\mathbf{t}^{propio})] = \mathbf{Y}_{v}^{HD}\tilde{\mathbf{v}}^{H}$$

En donde $\mathbf{Y}_v^{HD}$ es una matriz que contiene solamente los elementos de la diagonal de la matriz $\mathbf{Y}_v^H$, y $\tilde{\mathbf{v}}^H$ corresponde a un vector de ponderación del valor agregado, razón por la cual $\sum_j \tilde{v}_j^H = \mathbf{1}$. En este caso, la ponderación que empleo solo corresponde al valor agregado que se calcula en unidades monetarias porque se dispone de esta información en las mismas unidades de medida para todos los sectores. En unidades físicas esta información no se interpreta con el mismo sentido del valor agregado, pues en unidades físicas se cumplen las condiciones de conservación.

Ahora, el componente puro de los encadenamientos se construye al aislar los elementos de la diagonal en la matriz $\mathbf{Y}_v^H$. Para ello, defino la matriz TY_v^H, como planteo a continuación:

$$TY_v^H = [TY_{V_i}^H] = [\sum_{j \neq i} Y_{v_{ij}}^H] = (Y_v^H - Y_v^{HD})\mathbf{1_n}$$

En donde se excluye los elementos de la diagonal de la matriz $\mathbf{Y}_v^H$. A partir de aquí se define el componente puro de los encadenamientos hacia adelante así:

$$\mathbf{f}^H(\mathbf{t}^{puro}) = [\mathbf{f}_i^H(\mathbf{t}^{puro})] = \widehat{TY}_v^H \tilde{\mathbf{v}}^H$$

Resultados

En esta sección presento resultados de los encadenamientos asociados a la estructura económica del Ecuador y al consumo energético durante el año 2016. Empleo una matriz económica y una matriz energética. En el caso de la información económica, considero la matriz de utilización distribuida entre 69 sectores económicos, que se halla expresada en miles de dólares de 2007. La descripción de estos 69 sectores se puede revisar en el anexo 1, codificación B.

La versión original de esta matriz registra 71 actividades económicas, sin embargo, a fin de procesar la información agrego las cifras de cuatro sectores económicos. En principio, consolido en una sola categoría los sectores codificados como 27001 y 27002 que corresponden a fabricación de vidrio, productos refractarios y de cerámica, y fabricación de cemento, artículos de hormigón y piedra, respectivamente. Asimismo, agrego la información correspondiente a los códigos 35001 y 35002 de comercio al por mayor y al por menor; incluido comercio de vehículos automotores y motocicletas, y servicios de reparación y mantenimiento de vehículos de motor y motocicletas (anexo 1, codificación B).

La última agregación habilita la inversión de la matriz $\hat{\mathbf{x}}$, porque la información de los insumos productivos que alimentan el proceso productivo del sector 35001 no registra datos, es decir, muestra solamente valores nulos para todos los años del periodo de análisis (una fila de valores nulos). Por otro lado, la agregación del sector 27 tiene la ventaja de que evita la inclusión de datos negativos en la demanda final, que pueden alterar la lectura y/o interpretación en los resultados de los encadenamientos.

Ambas agregaciones son conceptualmente correctas porque se corresponden al mismo sector dentro del nivel superior de la clasificación de cuentas nacionales. Al procesar con estos cambios la información de todos los años que componen el periodo de análisis existe comparabilidad interanual de los resultados obtenidos. No resuelvo, sin embargo, que la suma negativa del valor agregado, las importaciones y los impuestos correspondientes al sector 35001 de comercio al por mayor y al por menor, incluido comercio de vehículos automotores y motocicletas. Esto sucede porque, según el reporte de la tabla de utilización, el consumo doméstico de esta actividad supera la oferta total. Este aspecto se toma en consideración al desarrollar el análisis de encadenamientos.

Para estimar los encadenamientos productivos, empiezo por calcular las matrices de coeficientes técnicos, tanto desde el enfoque de la demanda (las matrices **A** y **L** del modelo tradicional de Leontief) como desde el enfoque de la oferta (las matrices **B** y **G** del modelo de Ghosh). Los resultados de los indicadores de los encadenamientos económicos los presento en el anexo 2, a fin de centrar el contenido principal de este capítulo en el análisis del sistema energético. Para ello, sigo el procesamiento propuesto por Miller y Blair (2009) que he explicado previamente.

La información energética, en cambio, se analiza a partir de la matriz de consumo energético intersectorial que se deriva de la aplicación del modelo de energía incorporada de Alcántara y Roca (1995). Esta matriz originalmente muestra información para **m = 13** sectores energéticos y no energéticos y **n = 71** sectores económicos. Tal como en el caso de la tabla de utilización, agrego los sectores **27** y **35** para definir una matriz de dimensión **13 x 69**.

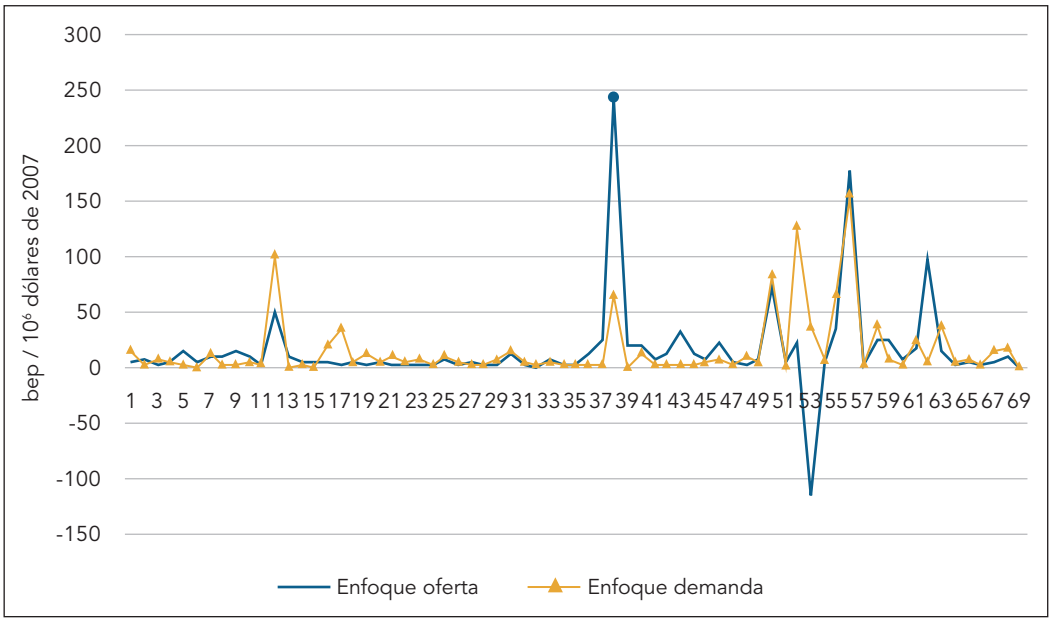
En las tres secciones siguientes, presento en primer lugar los cómputos del consumo energético directo e indirecto del sistema ecuatoriano que corresponden al modelo de energía incorporada. En segundo lugar, expongo los resultados de los encadenamientos del sistema energético en una adaptación de la propuesta de Alcántara (2007) que denomino modelos de energía primaria incorporada. En tercer lugar, en la sección de discusión comparo los resultados económicos y energéticos.

Encadenamientos desde el modelo de energía primaria incorporada

En esta sección presento los resultados de la aplicación de los cálculos del consumo energético interindustrial que describo en la primera parte del libro. Me concentro en el indicador de consumo ponderado $\tilde{\mathbf{e}}^{Pt}$ (gráfico 5.1), que sirve de base para el análisis de encadenamientos del sistema energético. Hay que recordar que este cálculo se realiza tanto desde un enfoque de oferta como de demanda, por ello, se trata de una comparación de provisión y uso de insumos desde cada una de estas perspectivas.

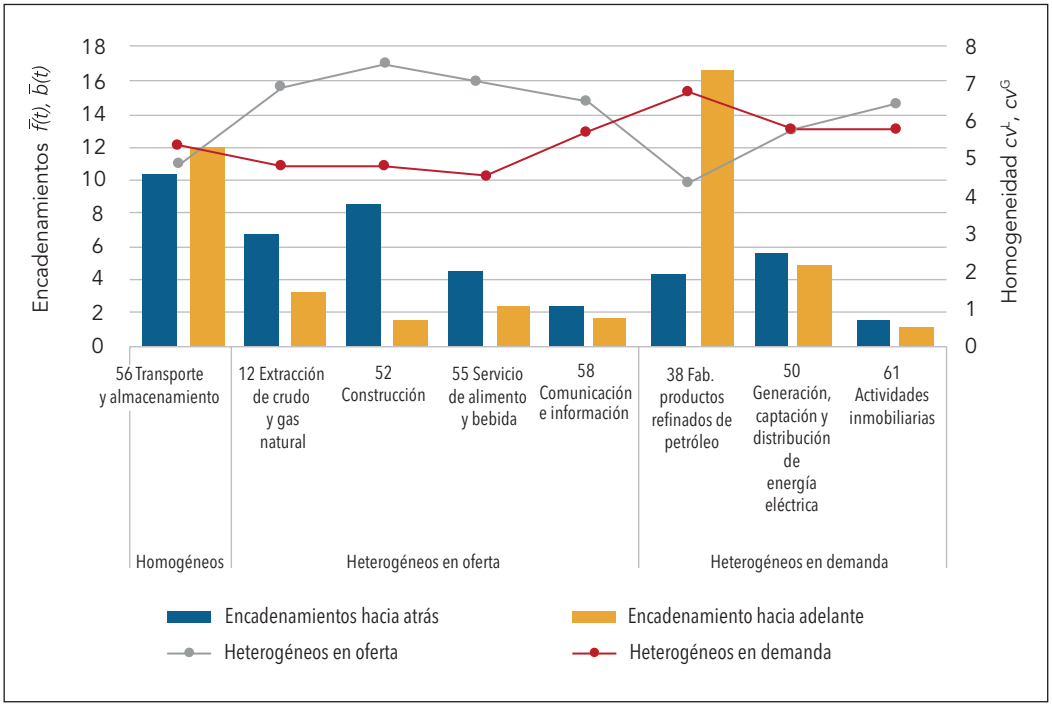
Cabe indicar que un consumo negativo se registra en el sector de comercio al por mayor. Este resultado no sorprende porque el consumo interno de ese sector es superior a la oferta total. De esta manera, la diferencia negativa se ubica en las cuentas de balance de la matriz que corresponden a las importaciones y al valor agregado bruto del sector.

Gráfico 5.1. Consumo ponderado de energía. MEI



Nota: en el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

Gráfico 5.2. Sectores energéticos clave. MEI



Nota: $Me(cv^L)$=5,74 (cv^L > 5,74: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^G)$=5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta).

Tal como en los encadenamientos económicos, clasifico a los sectores según las características de los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás que les corresponden en el sistema energético concebido desde el modelo de energía incorporada para la economía ecuatoriana en 2016.

En este caso se interpretan encadenamientos energéticos en lugar de productivos, esto significa que se analiza el efecto total, directo e indirecto, de un sector en el resto del sistema energético. Cuando se trata de encadenamientos energéticos hacia adelante, se identifican los sectores que proveen insumos energéticos a otras industrias. Cuando se analizan encadenamientos energéticos hacia atrás, se identifican los sectores que requieren insumos energéticos de otras industrias para operar. En el caso de los sectores energéticos clave se trata de los principales proveedores y consumidores de insumos energéticos.

Los efectos totales sirven para medir el grado de conexión directa e indirecta entre los sectores energéticos que analizo. En particular, la conexión indirecta tiene lugar porque algunos sectores producen a partir de la producción de otros, por lo que su expansión a la vez impulsa a los abastecedores a incrementar su producción. El estímulo a los sectores que abastecen materias primas permite, al mismo tiempo, promover al resto de las industrias compradoras. Esta es una cadena de intercambios que alimenta el efecto total que produce cada sector en el conjunto del sistema energético.

Sectores clave

Para el Ecuador en 2016 se identifican ocho sectores clave porque muestran significativos encadenamientos energéticos hacia adelante y hacia atrás. En este caso, dentro de este grupo solo un sector es primario, uno es secundario y los otros seis son de servicios. Las actividades con mayores encadenamientos hacia adelante son la fabricación de productos refinados de petróleo y el transporte. El transporte y la construcción muestran los más significativos encadenamientos hacia atrás. En la mayoría de las actividades los encadenamientos hacia atrás superan a los encadenamientos hacia adelante.

Este grupo se categoriza, a su vez, en tres niveles de homogeneidad. En primer lugar, el transporte y almacenamiento es homogéneo, lo que significa que su impulso a la oferta y a la demanda de insumos se distribuye uniformemente entre todas las actividades. En estas condiciones, se trata de una actividad que no muestra riesgos para exceder la provisión de insumos ni desabastecer el consumo. En segundo lugar, puede haber algún riesgo de exceder la oferta en el caso de las actividades de extracción de crudo y gas natural, construcción, servicio de alimento y bebida y en los servicios de comunicación e información, que se categorizan como sectores clave heterogéneos en la oferta. Por último, identifico en la fabricación de productos refinados de petróleo; la generación, captación y distribución de energía eléctrica, y las actividades inmobiliarias un riesgo moderado de escasez de algunos insumos, porque se trata de sectores clave dentro del sistema energético que operan en el marco de una estructura de demanda concentrada y una estructura homogénea de oferta de insumos.

A partir de la estimación de la energía primaria incorporada he encontrado tres sectores clave de intersección entre el sistema económico y el sistema energético. El sector de transporte y almacenamiento es un sector homogéneo en ambos sistemas. La generación, captación y distribución de energía eléctrica y la fabricación de productos refinados de petróleo coinciden como sectores clave heterogéneos en la demanda en el sistema productivo y en el energético (gráfico 5.2).

Impulsores de la oferta

Identifico siete sectores, cinco secundarios y dos de servicios, que impulsan la oferta energética en el Ecuador; ninguno es primario. Dentro de este grupo, también conocido como el conjunto de sectores de base, los más altos encadenamientos hacia adelante corresponden a las actividades profesionales, técnicas y administrativas (gráfico 5.3).

La mayor parte de sectores en este grupo son homogéneos en la oferta y, a su vez, heterogéneos en la demanda. En estas condiciones se puede constatar un bajo riesgo de escasez de sus insumos.

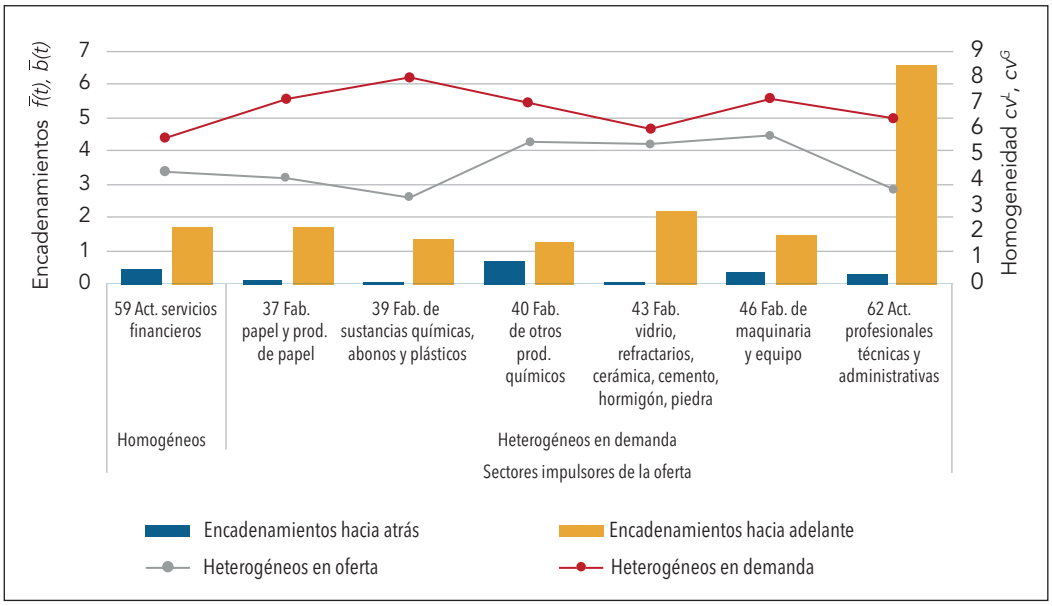
Los sectores que impulsan la oferta en el análisis energético componen un grupo más compacto en contraste con aquellos que impulsan la oferta en el análisis económico. Registro siete sectores en lugar de 21. Tal como en el caso de los sectores clave, identifico algunas coincidencias en la distribución de las actividades que impulsan la oferta. Tanto en la evaluación económica como en la energética, las actividades de servicios financieros son impulsores de oferta homogéneos. Asimismo, en ambos casos es un sector de base y, al mismo tiempo, heterogéneo en la demanda la fabricación de papel, sustancias químicas, vidrio, cerámica, cemento, hormigón y piedra, y las actividades profesionales técnicas y administrativas.

Impulsores de la demanda

En este grupo identifico a los motores del sistema energético, que comprende un total de seis sectores, ninguno de ellos primario, dos secundarios, y cuatro de servicios. En este caso, los mayores encadenamientos hacia atrás corresponden a los sectores de comercio y reparación de automotores; administración pública, defensa y seguridad social; y procesamiento y conservación de camarón (gráfico 5.4).

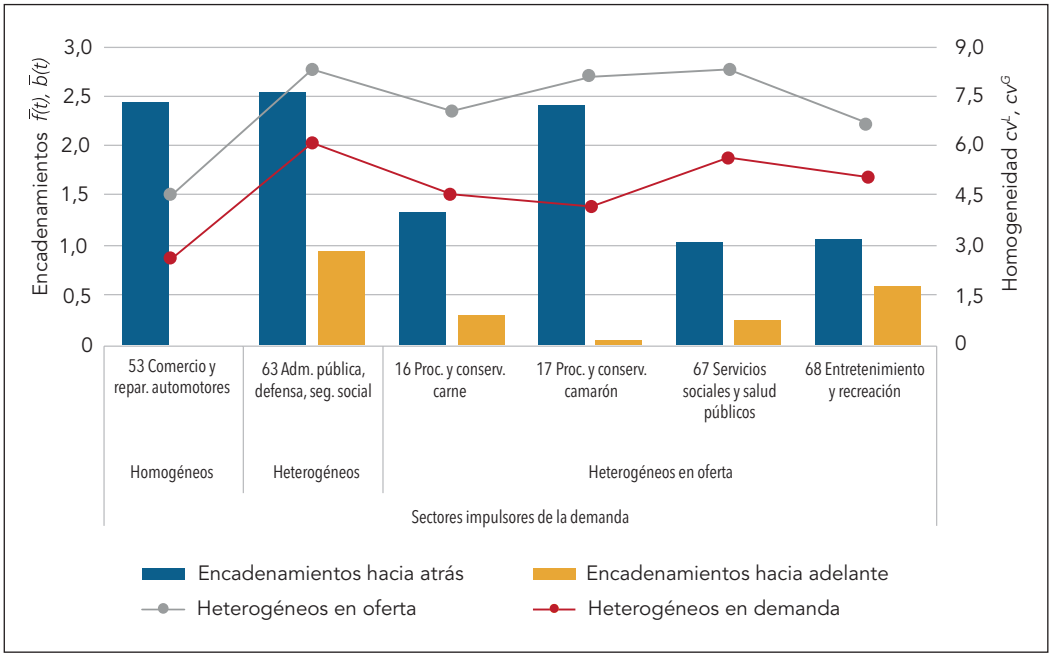
En este grupo identifico tres categorías de homogeneidad. El comercio y la reparación de automotores es la única actividad homogénea en la oferta y en la demanda, y, por lo tanto, con bajo riesgo de desabastecimiento en la demanda de insumos. En el otro extremo se encuentran los servicios de administración pública, defensa y seguridad social que son heterogéneos, tanto en la oferta como en la demanda, y en esas condiciones pueden mostrar desequilibrios. Finalmente, en la última categoría se encuentran actividades con una oferta concentrada en pocos sectores, entre las cuales destaca el procesamiento de camarón. En este caso existe un riesgo moderado de desequilibrios en la oferta de insumos porque la provisión se halla concentrada en pocos sectores.

Gráfico 5.3. Sectores energéticos impulsores de la oferta. MEI



Nota: $Me(cv^L)$=5,74 (cv^L > 5,74: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^G)$=5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.4. Sectores energéticos impulsores de la demanda. MEI



Nota: $Me(cv^L)$=5,74 (cv^L > 5,74: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^G)$=5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta).

A diferencia del análisis económico en que estudié 16 sectores impulsores de la demanda, en este caso evalúo solo seis. En ambos tipos de evaluación, las actividades de procesamiento de carne y camarón, y la de entretenimiento y recreación, son sectores que impulsan la demanda desde una estructura homogénea, aunque heterogénea en términos de la provisión de insumos.

Sectores independientes

Los sectores independientes con débiles encadenamientos hacia adelante y hacia atrás en el sistema energético componen el grupo más nutrido en la clasificación que he empleado en este análisis. Identifico 48 actividades independientes, de las cuales 14 son primarias, 26 secundarias y ocho son de servicios (gráfico 5.5).

Asimismo, encuentro intersecciones entre la evaluación económica y energética de este grupo en un total de 17 actividades. En términos económicos, este número corresponde al 74 % de sectores (17:23). Aunque en la siguiente gráfica presento los distintos grados de homogeneidad que caracterizan a estos sectores, no me detengo en el análisis de esta categoría porque se trata de actividades que no muestran encadenamientos significativos con las demás.

Otros indicadores de encadenamientos energéticos

Encadenamientos directos

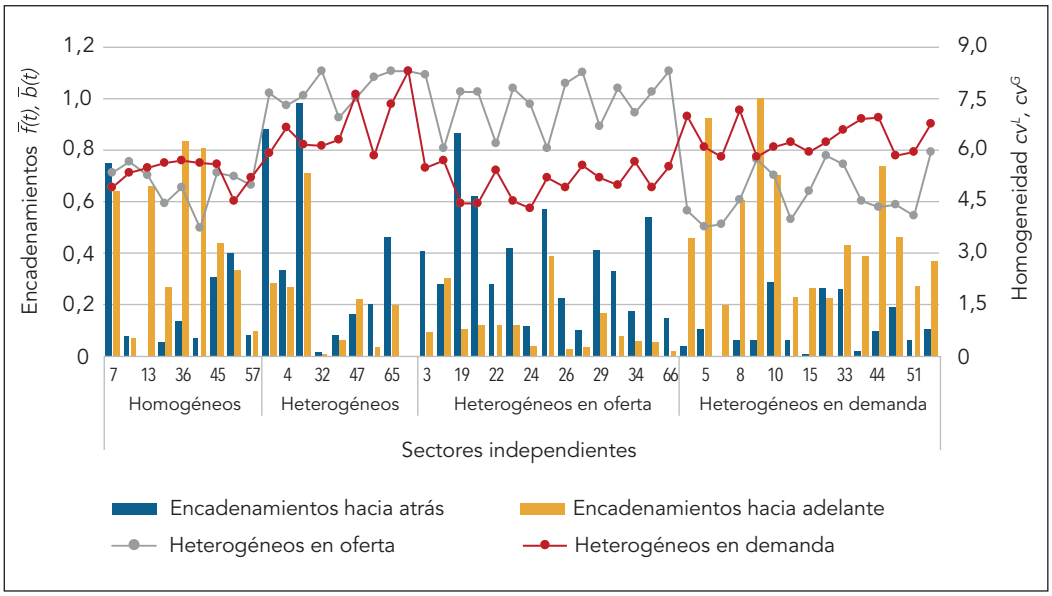
En esta sección analizo los encadenamientos directos de las actividades energéticas. Se interpreta que en una primera fase de intercambios; es decir, en los intercambios directos, la demanda de insumos energéticos o su venta generan estímulos para otros sectores. En otras palabras, existe un impacto directo desde un sector determinado hacia el resto de la economía que se mide por el impulso a otros sectores, los cuales se encuentran vinculados por los intercambios de energía para la transformación.

Como he explicado, clasifico los intercambios directos según dos categorías: manufactureros y no manufactureros, y de destino intermedio y final.

a. Sectores manufactureros de destino intermedio

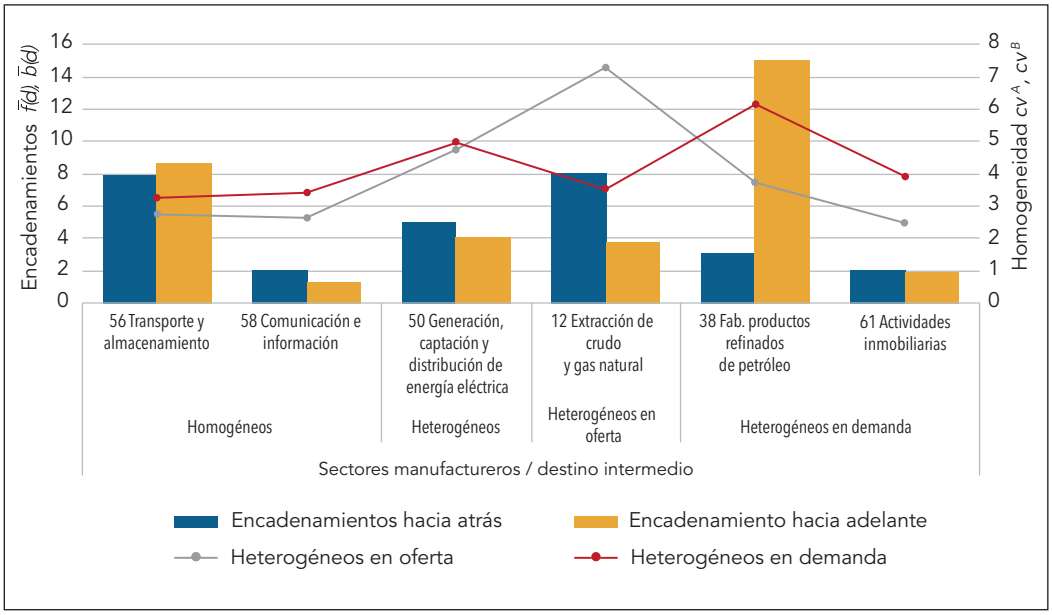
Estos sectores muestran altos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, por lo que tienen una fuerte conexión con los demás respecto a la provisión y requerimiento de energía. De esta manera, estos sectores presentan un alto nivel de articulación directa en la producción interna. Dentro del grupo destacan los encadenamientos hacia adelante del sector de fabricación de productos refinados de petróleo, y dentro de los encadenamientos hacia adelante las actividades más representativas son la extracción de crudo y gas natural, y el transporte y almacenamiento. Estos son sectores clave del sistema energético por su oferta y demanda de insumos, y al ubicarse como actividades

Gráfico 5.5. Sectores energéticos independientes. MEI



Nota: $Me(cv^L)$=5,74 (cv^L > 5,74: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^G)$=5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta). En el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

Gráfico 5.6. Sectores manufactureros de destino intermedio. MEI



Nota: $Me(cv^A)$ = 3,72 (cv^A > 3,72: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^B)$=4,11 (cv^B > 4,11: Heterogéneo en la oferta).

de manufactura con destino intermedio, muestran potencial de promover transacciones en rondas posteriores del intercambio intersectorial.

Se puede ver intersecciones entre esta clasificación y la correspondiente a los encadenamientos totales (sectores clave) en tres actividades: fabricación de productos refinados de petróleo; generación, captación y distribución de energía eléctrica; y transporte y almacenamiento. En estos sectores energéticos, los elevados encadenamientos transmiten sus efectos a las siguientes rondas de transacciones, por lo que potencian sus intercambios interindustriales también indirectos (gráfico 5.6).

b. Sectores manufactureros de destino final

Estos sectores son los mayores consumidores de insumos en el sistema porque presentan altos encadenamientos hacia atrás. Debido a la gran cantidad de productos intermedios que procesan, se identifican como manufactureros. El destino de su producción es la demanda final porque muestran bajos encadenamientos hacia adelante, es decir, se trata de sectores que no proveen significativos insumos al sistema, sino productos de uso final. Destaca en este grupo la posición del sector de la construcción por sus encadenamientos hacia atrás.

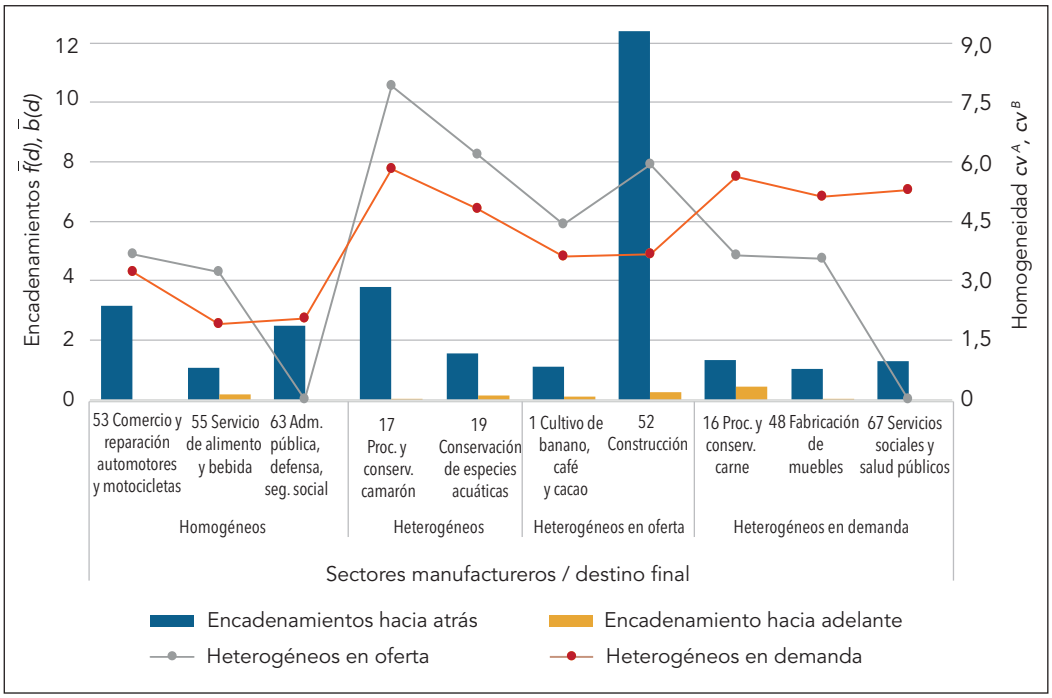
Al observar las intersecciones con la clasificación que aplico a los encadenamientos totales, esta categoría se identifica con los siguientes sectores que son impulsores de la demanda o motores de la economía: procesamiento y conservación de carne y camarón; comercio; administración pública, defensa y seguridad social, y servicios de salud públicos. Esto significa que la demanda de insumos energéticos se origina no solamente en actividades industriales, sino también en actividades de servicios (gráfico 5.7).

c. Sectores no manufactureros de destino intermedio

Estos sectores se caracterizan como no manufactureros porque sus encadenamientos directos hacia atrás son bajos, lo que significa que como consumidores de insumos energéticos son irrelevantes en el sistema o, en otros términos, no procesan manufacturas energéticas. Asimismo, debido a la estructura de sus encadenamientos hacia adelante, se catalogan como importantes proveedores de insumos. Se destacan en este grupo las actividades profesionales, técnicas y administrativas por sus altos encadenamientos hacia adelante. Estos sectores son productores primarios de insumos energéticos en el sistema, lo que significa que su rol es principalmente alimentar al sistema energético de bienes intermedios.

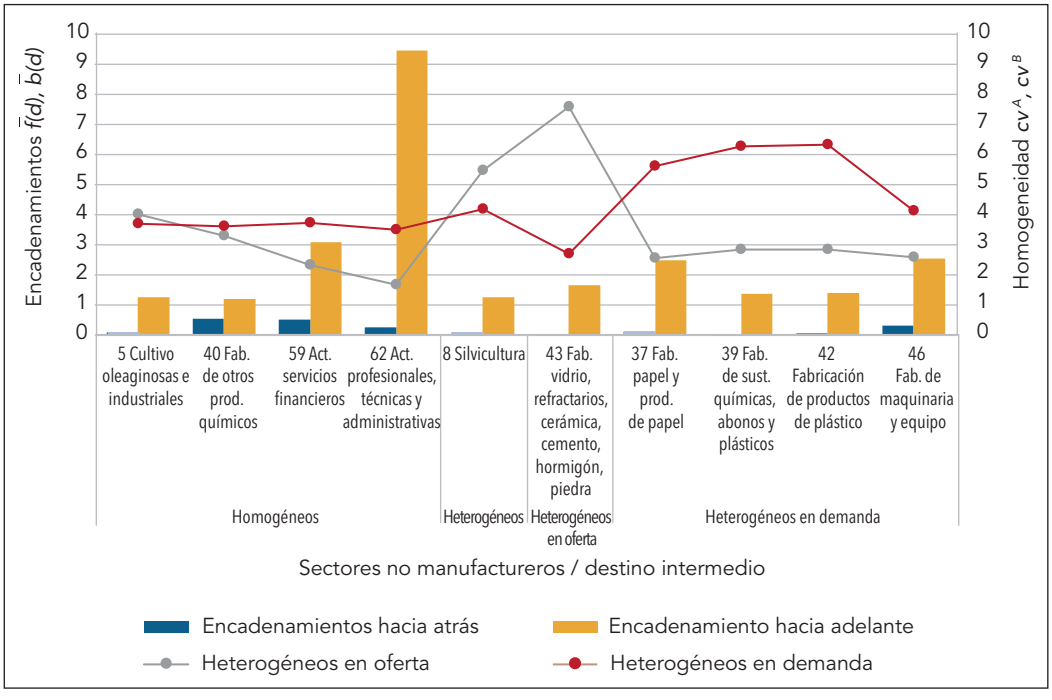
He encontrado muchas intersecciones entre este grupo y el correspondiente a los impulsores de oferta o sectores de base que analizo para los encadenamientos totales. De un total de diez sectores en los encadenamientos directos, hallo coincidencias en siete encadenamientos totales: cinco son industriales (fabricación de papel; sustancias químicas y abonos; otros productos químicos; vidrio, refractarios, cementos y hormigón; maquinaria y equipo) y dos son actividades de servicios (servicios financieros y actividades profesionales, técnicas y administrativas). Esto implica que en estos sectores de base se identifica un mayor potencial para promover transacciones en fases posteriores del intercambio (gráfico 5.8).

Gráfico 5.7. Sectores manufactureros de destino final. MEI



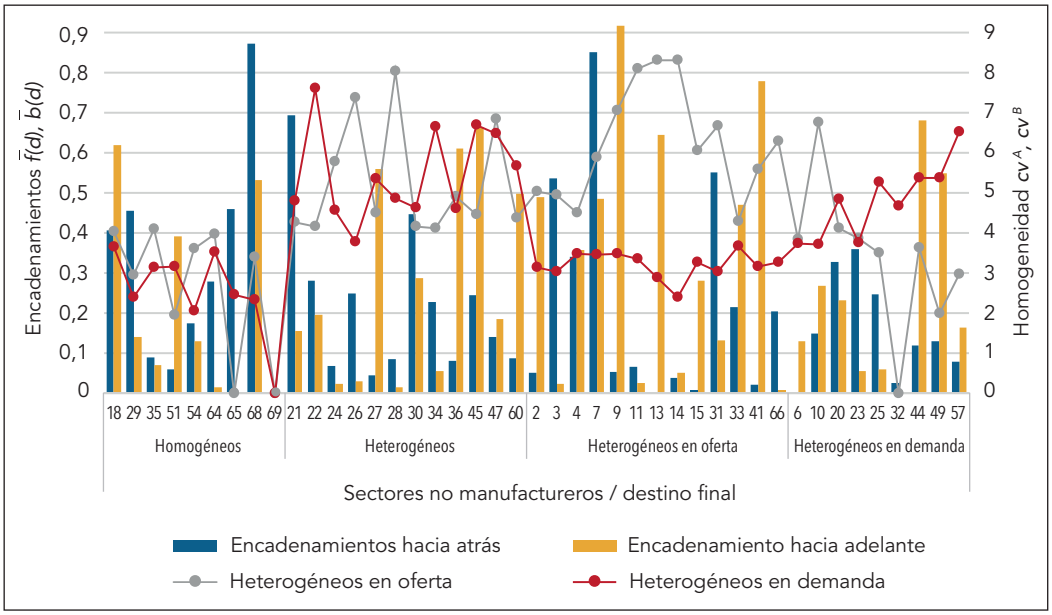
Nota: $Me(cv^A)$ = 3,72 (cv^A > 3,72: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^B)$=4,11 (cv^B > 4,11: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.8. Sectores no manufactureros de destino intermedio. MEI



Nota: $Me(cv^A)$ = 3,72 (cv^A > 3,72: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^B)$=4,11 (cv^B > 4,11: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.9. Sectores no manufactureros de destino final. MEI



Nota: $Me(cv^A)$ = 3,72 (cv^A > 3,72: Heterogéneo en la demanda), $Me(cv^B)$ = 4,11 (cv^B > 4,11: Heterogéneo en la oferta). En el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

d. Sectores no manufactureros de destino final

Desde la clasificación de encadenamientos totales, a estos sectores se los identifica como independientes porque muestran bajos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás. En este contexto, los bajos encadenamientos hacia atrás y hacia adelante ubican a estas actividades como consumidores marginales de insumos y proveedores marginales de insumos, respectivamente. Si su rol no se identifica con la utilización de muchos insumos, se corresponden con actividades que no los procesan y, por ende, no son manufactureras en el sentido de sus encadenamientos. Asimismo, si no proveen insumos para el sistema, se puede concluir que el destino de su producción es el consumo final.

En este grupo se identifican 43 actividades: 11 son primarias, 23 son manufacturas y productos industriales y nueve corresponden a servicios. El único sector en este grupo que no es a su vez independiente cuando se incluyen los encadenamientos indirectos en el análisis corresponde a las actividades de entretenimiento, recreación y otras (gráfico 5.9).

Encadenamientos propios y puros

Como he explicado en la sección metodológica, se pueden distinguir los efectos del consumo energético en sus componentes propios y puros. Por una parte, aquellas actividades con un alto componente propio sostienen procesos de transformación de alto consumo energético. Por otra parte, las actividades con un alto componente puro se caracterizan

por impulsar de manera indirecta el consumo energético en otros sectores o, dicho de otra forma, los procesos de transformación en otros sectores son los que determinan el consumo energético.

Los siguientes gráficos muestran los sectores con mayores encadenamientos propios y puros, hacia adelante y hacia atrás. Tanto en términos de oferta como de demanda, los sectores de productos refinados de petróleo (38), generación, captación y distribución de energía eléctrica (50) y transporte y almacenamiento (56) tienen altos encadenamientos energéticos propios. Es decir, son actividades que inmanentemente promueven el consumo energético desde su propio proceso de transformación.

En cambio, los sectores de extracción de petróleo crudo y gas natural (12) y transporte y almacenamiento (56) coinciden en altos encadenamientos puros hacia adelante y hacia atrás. Identifico a estos sectores como promotores indirectos de consumo energético en el resto del sistema nacional. Hay que notar que el sector de transporte y almacenamiento evidencia una doble predominancia desde estos indicadores, por lo que las medidas orientadas a regular este sector serán efectivas para promover eficiencia o reducir la escala de consumo en todo el sistema energético nacional tanto desde la oferta como desde la demanda. Un rol similar puede desempeñar el sector de extracción de petróleo crudo y gas natural. Sin embargo, en este segundo caso, la diseminación de impactos de una política pública puede afectar de manera efectiva principalmente a la oferta energética. El efecto sobre la demanda será importante solamente respecto del consumo del propio sector.

En otro aspecto, las políticas que regulen al sector de generación de energía eléctrica también serán fundamentales para una transición energética del sistema. En este caso, sin embargo, los impactos serán más efectivos en la transformación del propio sector antes que en el resto del sistema energético.

Las actividades profesionales, técnicas y administrativas (62) y la extracción de petróleo crudo y gas natural (12) son casos particulares que promueven el consumo energético del resto del sistema desde la provisión de insumos energéticos. Asimismo, el servicio de alimentos y bebidas (55), que impulsa el consumo energético como parte de la propia actividad con encadenamientos propios hacia adelante y hacia atrás.

Finalmente, cabe indicar que los sectores que no se hallan identificados en los gráficos que presento son aquellos que mantienen bajos encadenamientos propios y puros hacia adelante y hacia atrás, por lo que una intervención de política pública en estos será menos efectiva (gráfico 5.10 y 5.11).

Encadenamientos desde el modelo de unidades híbridas

El punto de partida de este análisis es la matriz insumo-producto de unidades híbridas que construimos en un capítulo previo. Esta matriz muestra los intercambios en los sectores energéticos en unidades físicas y los intercambios en los sectores económicos en unidades monetarias. Me interesa contrastar los resultados presentados en la sección previa con los de este modelo. Argumento que la estructura de encadenamientos será diferente porque en este caso analizaré los procesos energéticos y económicos desde sus propias unidades,

Gráfico 5.10. Encadenamientos propios y puros hacia adelante. MEI

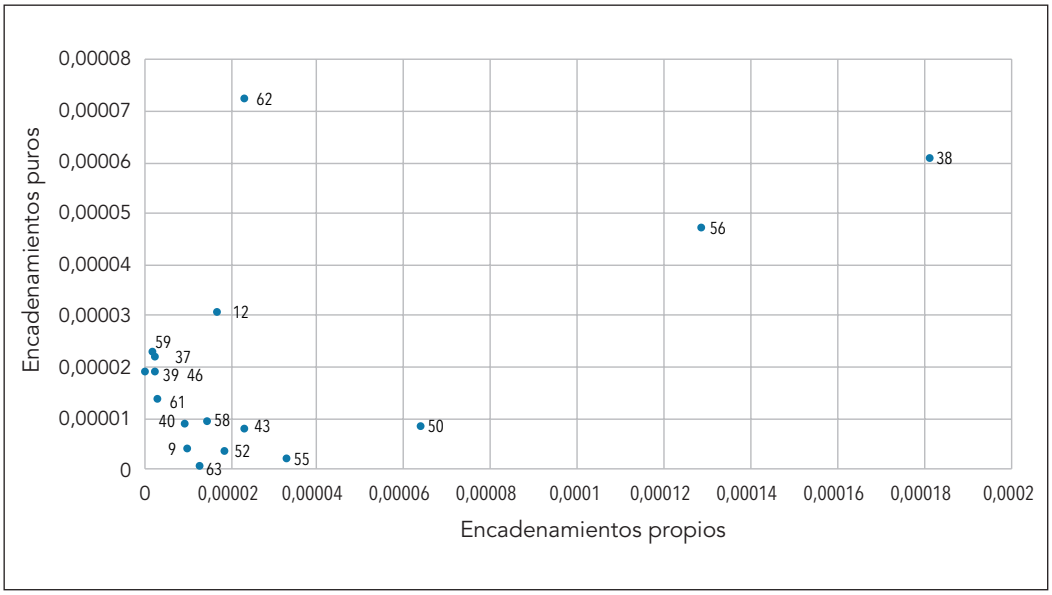
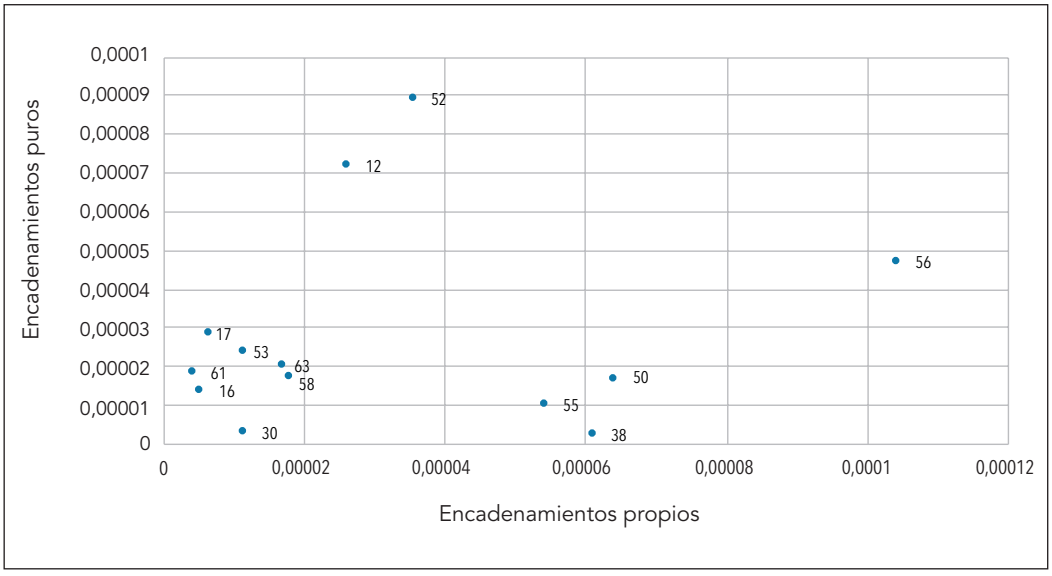


Gráfico 5.11. Encadenamientos propios y puros hacia atrás. MEI



Nota: en el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan en los gráficos 5.10 y 5.11.

sin que medie en el análisis un precio implícito que traduzca intercambios energéticos a valores económicos o viceversa. Esta especificación es importante para consolidar en un solo marco de análisis a los intercambios físicos y a los económicos vinculados al sistema energético ecuatoriano.

A continuación, muestro la clasificación sectorial que identifica diferentes tipos de actividades según la contribución de sus encadenamientos totales. Para ello, sigo los mismos procedimientos y criterios de clasificación que empleé en el análisis de la sección previa.

Sectores clave

Desde este enfoque de análisis, solamente existen dos sectores clave en la economía ecuatoriana durante 2016 que corresponden a los productos derivados de petróleo, es decir, se trata de fuentes secundarias de energía (gráfico 5.12). En este grupo, las conexiones hacia atrás son mayores que las conexiones hacia adelante y muestran condiciones de heterogeneidad en sus coeficientes técnicos. A diferencia de los encadenamientos económicos y los energéticos que calculo a partir del método de energía primaria incorporada, en este caso solamente identifico sectores heterogéneos. Esto implica que una vez que se exploran el sistema energético y económico desde sus propias unidades, sean físicas o monetarias, se observa un sistema energético con potenciales desequilibrios en la oferta o en la demanda en estos sectores que son promotores de intercambios directos e indirectos con todo el sistema.

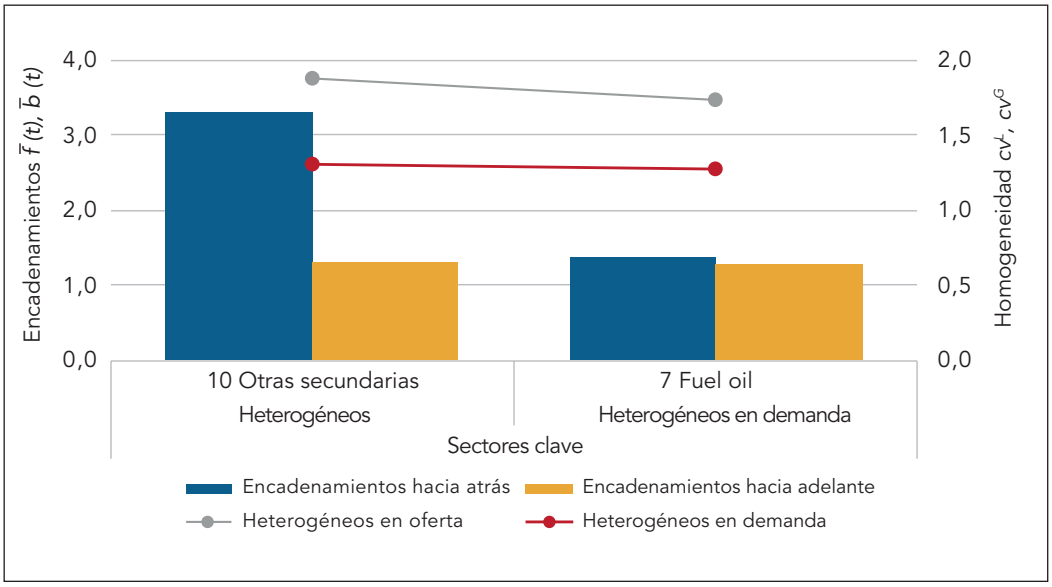
Impulsores de la oferta

Dentro de este grupo describo los sectores con importantes encadenamientos desde un enfoque de oferta, que también denomino sectores de base. Identifico siete sectores: cuatro corresponden a energía primaria y tres a energía secundaria (gráfico 5.13). No existen actividades económicas en este grupo. En este grupo el petróleo es el sector con mayores encadenamientos hacia adelante.

En relación con las condiciones de homogeneidad que caracterizan a estas actividades, constan tres categorías. Los sectores homogéneos, que corresponden a la caña de azúcar, el gas natural y las gasolinas y alcoholes, muestran una estructura de oferta con leve tendencia a desequilibrarse. En el otro extremo, los sectores que impulsan la oferta energética, pero evidencian una estructura de oferta y de demanda concentradas en pocos sectores, corresponden a la producción de kerosene y *jet fuel* y a la hidroenergía. Estas actividades sí muestran riesgos por exceso de oferta o de demanda de insumos. Finalmente, la explotación de petróleo y la producción de diésel son homogéneos en la oferta y, a la vez, heterogéneos en la demanda, lo que significa que pueden evidenciar escasez de insumos en determinado momento porque la demanda se halla concentrada.

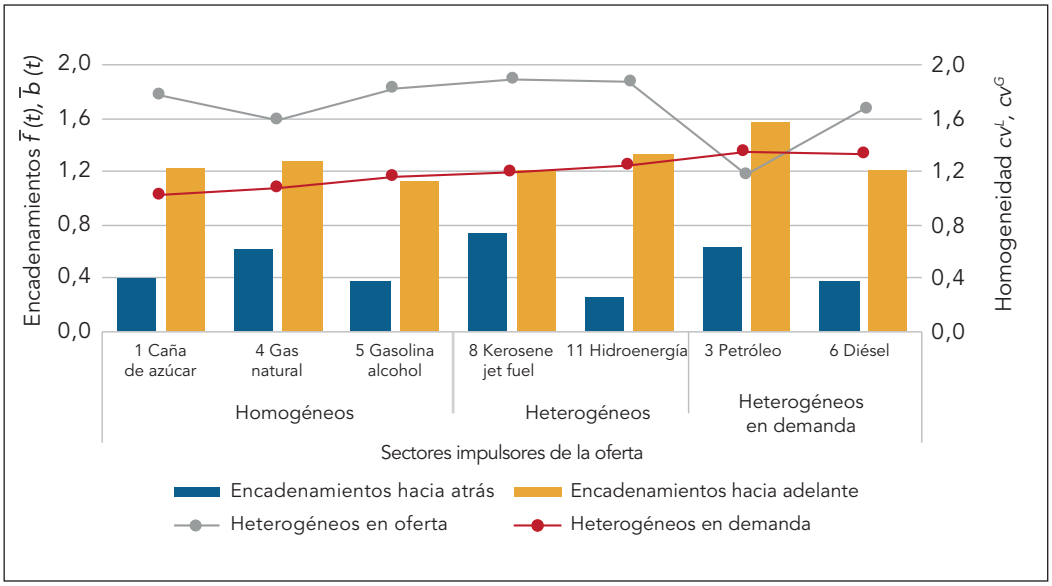
Es preciso notar que desde el método de unidades híbridas se registra una estructura distinta en la categorización de sectores. Por una parte, se trata de un grupo reducido de actividades que se analizan y, por otra, las unidades de medida distintas permiten

Gráfico 5.12. Sectores clave. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^L) = 1,18 (cv^L > 1,18: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^G)=1,85 (cv^G > 1,85: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.13. Sectores impulsores de la oferta. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^L) = 1,18 (cv^L > 1,18: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^G)=1,85 (cv^G > 1,85: Heterogéneo en la oferta).

identificar que, desde la realidad física de los flujos energéticos, las condiciones técnicas del intercambio intersectorial son con mayor frecuencia y fuerza heterogéneas, lo que se puede identificar con mayores riesgos de desequilibrios entre la oferta y la demanda de insumos energéticos.

Impulsores de la demanda

Dentro de esta categoría se encuentran cuatro sectores: tres de ellos económicos (comercial, servicios y sector público, construcción e industria) y una fuente secundaria de energía (electricidad) (gráfico 5.14). Los mayores consumidores del sistema son la electricidad y el sector comercial y de servicios, por esta razón, sus encadenamientos hacia atrás son los más elevados. Estos sectores dependen, sin embargo, de la oferta energética para su funcionamiento, por lo que bajo una estructura heterogénea de su oferta o su demanda se puede identificar ciertos riesgos de desabastecimiento o sobreabundancia de insumos.

El sector de la industria muestra heterogeneidad en sus coeficientes técnicos, es decir, es una actividad que moviliza la demanda de insumos de manera concentrada en unas pocas actividades, cuya provisión puede hallarse en riesgo porque la oferta de insumos también está concentrada en un pequeño grupo de sectores.

Los sectores de electricidad y construcción movilizan la demanda de insumos en un efecto que se halla distribuido de manera homogénea entre todos los consumidores. Existe un riesgo moderado de desequilibrios en la oferta de insumos porque la provisión se halla concentrada en pocas actividades. Finalmente, el sector comercial y de servicios muestra un riesgo significativo de desequilibrio en la demanda de insumos al ser heterogéneo en la demanda.

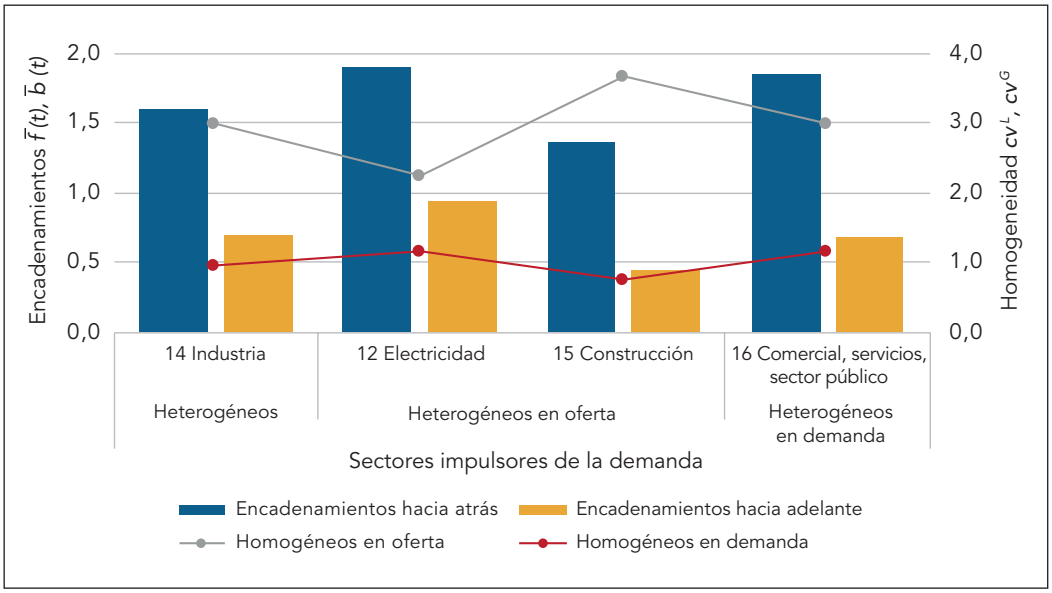
Los encadenamientos que resultan para este grupo de sectores son distintos a los que refleja el modelo de energía primaria incorporada y el análisis de la matriz insumo-producto económica. En este caso es preciso considerar que la información sectorial de las actividades económicas se encuentra en un nivel muy agregado.

Sectores independientes

En este grupo se encuentran cuatro sectores: dos de ellos son fuentes de energía energéticos y dos son consumidores de energía (gráfico 5.15). Estas actividades presentan encadenamientos poco significativos en términos de la oferta y de la demanda, por lo que sus conexiones con el resto del sistema son débiles.

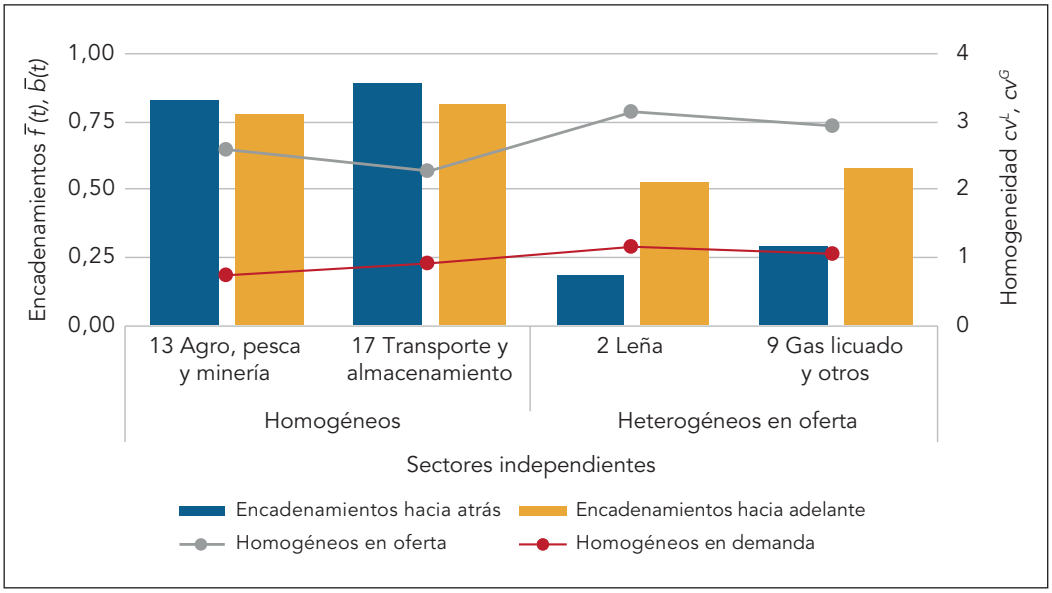
Identifico condiciones de homogeneidad en los sectores que se alimentan de energía, es decir, en el sector agrícola y minero, así como también en el de transporte. En cambio, son heterogéneos los sectores que alimentan con energía al sistema, es decir, la leña y el gas licuado. En este grupo identifico solo referencialmente el grado de homogeneidad de los sectores para entender su estructura. En este libro no profundizo en el análisis de esta categoría.

Gráfico 5.14. Sectores impulsores de la demanda. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^L) = 1,18 (cv^L > 1,18: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^G) = 1,85 (cv^G > 1,85: Heterogéneo en la oferta). *Me Econ* (cv^L) = 0,91 (cv^L > 0,91: Heterogéneo en la demanda), *Me Econ* (cv^G) = 2,99 (cv^G > 2,99: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.15. Sectores independientes. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^L) = 1,18 (cv^L > 1,18: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^G) = 1,85 (cv^G > 1,85: Heterogéneo en la oferta). *Me Econ* (cv^L) = 0,91 (cv^L > 0,91: Heterogéneo en la demanda), *Me Econ* (cv^G) = 2,99 (cv^G > 2,99: Heterogéneo en la oferta).

Otros indicadores de encadenamientos energéticos

Encadenamientos directos

En esta sección, además de presentar los resultados de estos indicadores para el caso de la aplicación del modelo de unidades híbridas, contrasto los resultados con aquellos que se derivaron en el modelo de energía primaria incorporada.

a. Sectores manufactureros de destino intermedio

Todos los sectores dentro de esta categoría son energéticos secundarios y su situación corresponde a actividades que emplean muchos insumos energéticos y, a la vez, proveen de insumos al resto del sistema (gráfico 5.16). En esas condiciones, son clave para el intercambio intersectorial de energía. Debido a sus encadenamientos hacia atrás, dentro de este grupo se destaca el sector de otras energías secundarias, que se refiere principalmente a derivados de petróleo no incluidos en otras categorías. Contrasto estos resultados con los que se obtienen al incorporar los encadenamientos indirectos, que corresponden a los sectores que se identifican como clave en el sistema. En el segundo caso ya no se identifica a la electricidad. Esto significa que solamente en la producción de otras fuentes secundarias y *fuel oil* se potencian encadenamientos de este tipo en las subsiguientes fases del intercambio.

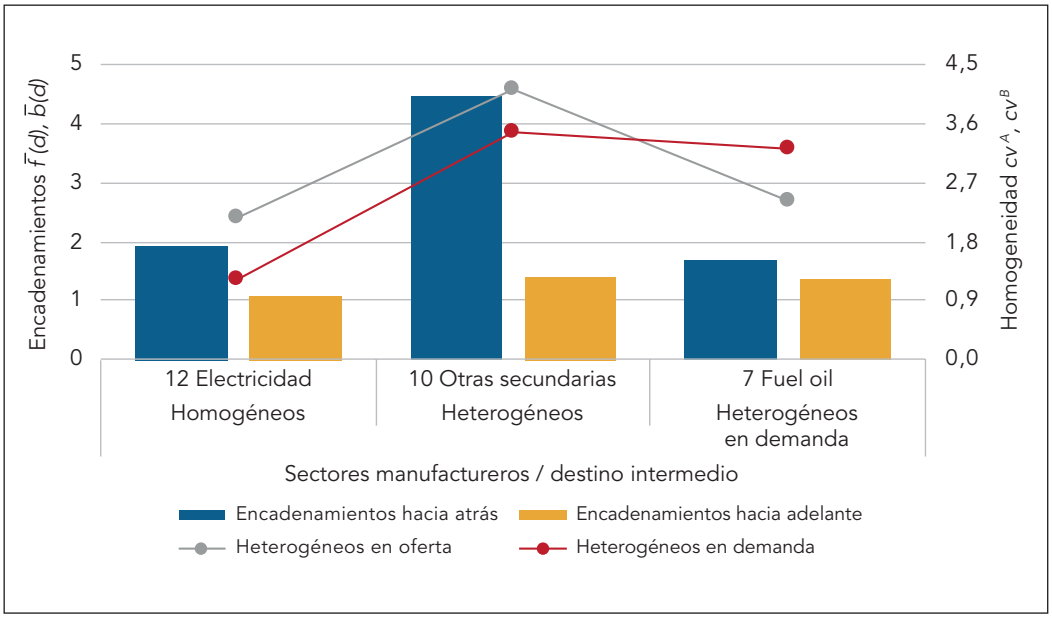
La información de este modelo no es comparable con aquella que se deriva del modelo de energía primaria incorporada, sin embargo, se pueden verificar intersecciones con los sectores de generación, captación y distribución de energía eléctrica; y fabricación de productos refinados de petróleo, que corresponden al modelo de energía primaria incorporada.

b. Sectores manufactureros de destino final

En esta categoría se ubican solamente sectores económicos cuyos encadenamientos hacia atrás son significativos. Estos sectores son los principales consumidores de bienes intermedios dentro del sistema cuya producción se destina a la demanda final porque no se ubican como significativos proveedores de insumos. Aunque el sector de la construcción se destaca por sus elevados encadenamientos hacia adelante, el resto de los sectores de este grupo evidencian una posición similar en este indicador. Cuando se incorporan los encadenamientos indirectos, se contrasta esta categoría con la de impulsores de la demanda o sectores motor del sistema.

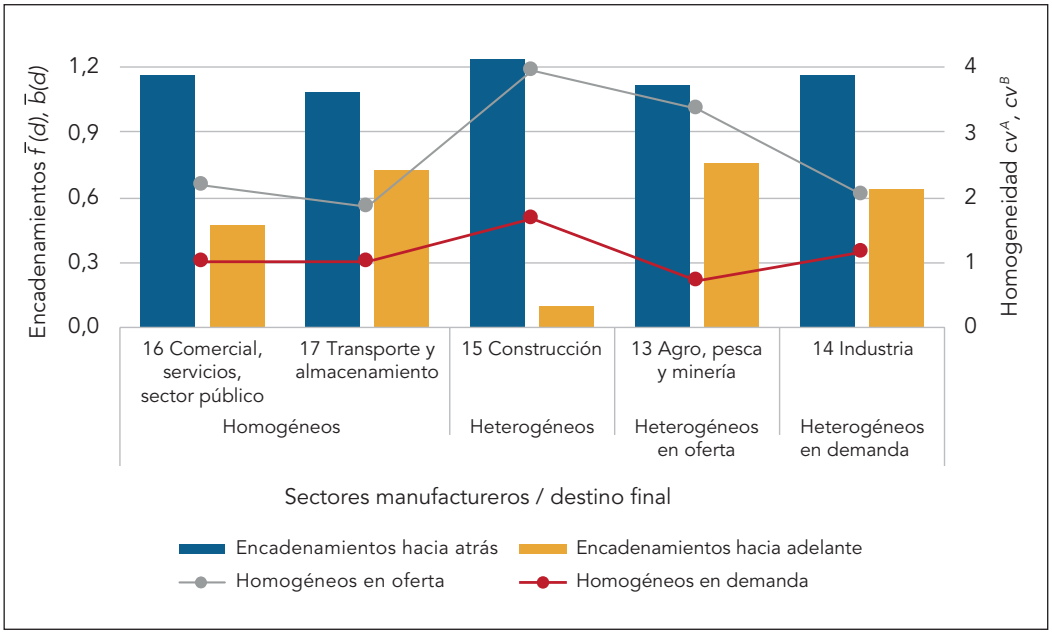
He encontrado intersecciones en tres de los cinco sectores que identifico como manufactureros de destino final respecto de los impulsores de demanda: comercial, de servicios y sector público; la industria, y la construcción (gráfico 5.17). Se interpreta que en estas actividades las transacciones que se desarrollan en las siguientes fases del intercambio potencian a estos sectores como impulsores de la demanda.

Gráfico 5.16. Sectores manufactureros de destino intermedio. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^A) = 3,21 (cv^A > 3,21: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^B) = 2,76 (cv^B > 2,76: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.17. Sectores manufactureros de destino final. MUH



Nota: *Me Econ* (cv^A) = 1,01 (cv^A > 1,01 : Heterogéneo en la demanda), *Me Econ*(cv^B) = 2,18 (cv^B > 2,18: Heterogéneo en la oferta).

Respecto de los resultados del modelo de energía primaria incorporada, aunque la clasificación sectorial no es comparable, se puede ver ciertas intersecciones entre los sectores comercial, servicios y sector público; construcción; el cultivo de banano, café y cacao –principal actividad agrícola nacional–, y algunos sectores industriales.

c. Sectores no manufactureros de destino intermedio

Estos sectores se identifican con bajos encadenamientos directos hacia atrás, razón por la cual su consumo en el sistema no se concentra en insumos energéticos, sino en productos finales. Su producción, sin embargo, se orienta a abastecer la utilización intermedia, es decir, son importantes proveedores de insumos energéticos para el sistema. Dentro de esta categoría, no se observa prevalencia de sector alguno debido a mayores encadenamientos hacia adelante que el resto de actividades.

Desde la lectura de encadenamientos totales, esta categoría se corresponde con la de impulsores de la oferta. Identifico exactamente los mismos sectores en ambas categorizaciones, con una ligera variación en el grado de homogeneidad que caracteriza al gas natural y a la gasolina y alcohol.

Finalmente, al contrastar esta categoría con su similar en el modelo de energía primaria incorporada, encuentro confluencia específicamente en el sector de producción de caña de azúcar, una actividad que se halla contenida en el cultivo de oleaginosas e industriales (gráfico 5.18).

d. Sectores no manufactureros de destino final

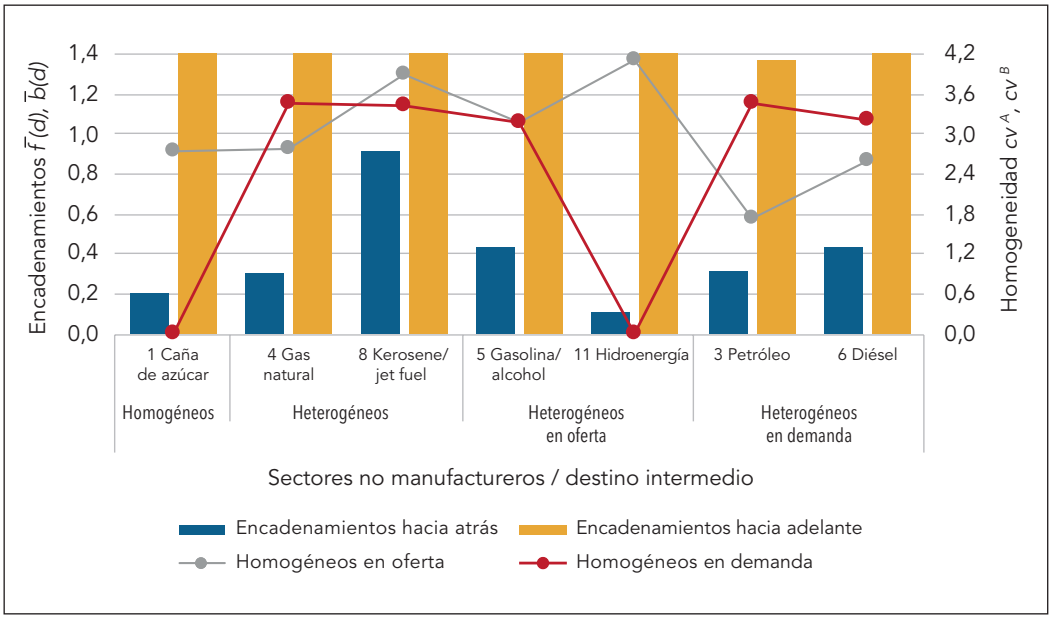
Estas actividades se identifican con consumidores de productos finales antes que con consumidores de productos intermedios, y, desde un enfoque de oferta, con proveedores de productos finales antes que proveedores de insumos. Por esta razón, son bajos los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás que se calculan en esta categoría para dos sectores. Ambos casos se corresponden con los sectores independientes en la clasificación de encadenamientos totales (gráfico 5.19). No contrasto esta información con los resultados del modelo de energía primaria incorporada porque los sectores no son comparables.

Encadenamientos puros y propios

En esta sección distingo entre los componentes propios y puros de los encadenamientos calculados a partir del modelo de unidades híbridas. En los gráficos 5.20 y 5.21 que presento a continuación constan los sectores con mayores encadenamientos propios y puros, hacia adelante y hacia atrás.

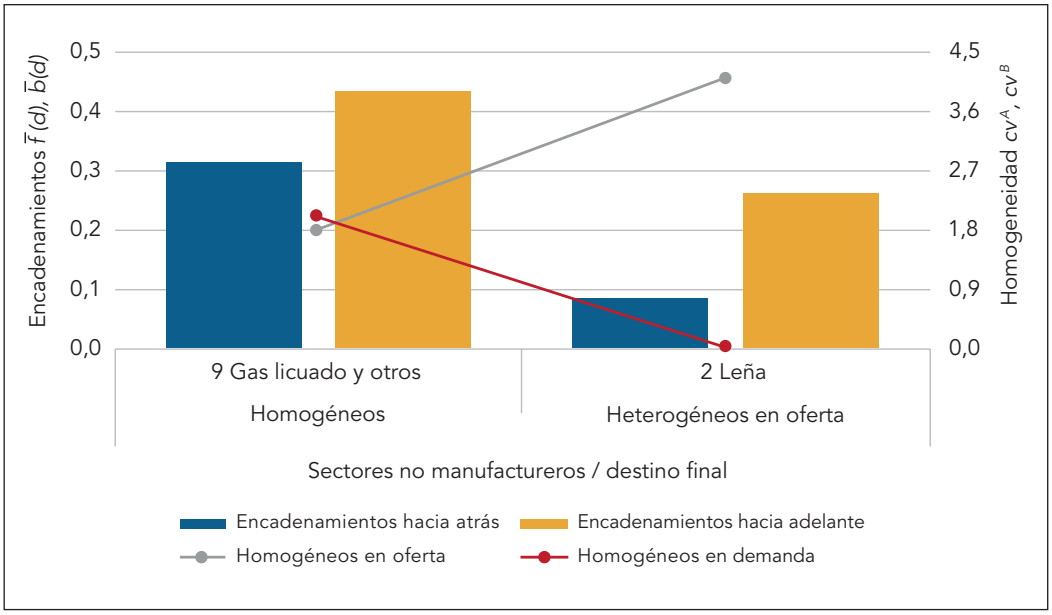
Desde el propio proceso de transformación identifico que coinciden los mayores encadenamientos hacia adelante y hacia atrás en el sector de electricidad (12), entonces, se interpreta esta actividad como promotora inmanente de consumo energético desde su propio proceso de transformación. Al mismo tiempo, su componente puro destaca desde

Gráfico 5.18. Sectores no manufactureros de destino intermedio. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^A) = 3,21 (cv^A > 3,21: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^B) = 2,76 (cv^B > 2,76: Heterogéneo en la oferta).

Gráfico 5.19. Sectores no manufactureros de destino final. MUH



Nota: *Me Energ* (cv^A) = 3,21 (cv^A > 3,21: Heterogéneo en la demanda), *Me Energ*(cv^B) = 2,76 (cv^B > 2,76: Heterogéneo en la oferta).

la demanda. En estas condiciones considero que pueden plantearse medidas orientadas a regular este sector para promover la eficiencia o reducir su propia escala de consumo, y extender este efecto al resto del sistema desde un enfoque de demanda, porque es en este ámbito en que pueden ubicarse con mayor efectividad las regulaciones para el consumo en el resto del sistema que se origina en los encadenamientos de este sector. Es importante anotar que este resultado se ratifica desde el modelo de energía primaria incorporada, aunque en ese caso solo en su componente propio. Esta intersección con el modelo de unidades híbridas es relevante porque evidencia una estrategia de política pública que puede orientarse desde estos indicadores.

Desde los encadenamientos puros hacia adelante destacan el petróleo (3) y el sector comercial, de servicios y público (16). Se interpreta que se trata de promotores indirectos del consumo energético en el resto del sistema nacional desde la provisión de insumos. En los encadenamientos propios hacia adelante se encuentran los sectores de transporte y almacenamiento (17) e industrial (14). Estos casos se cuentan como promotores directos del consumo energético porque este se origina en sus procesos internos en función de actividades de provisión de insumos para el sistema (gráficos 5.20 y 5.21).

Es preciso notar que, desde el modelo de energía primaria incorporada, el sector de transporte es relevante desde el componente puro de sus encadenamientos antes que desde el componente propio. En el otro extremo se encuentra el consumo de gas licuado de petróleo y otros gases (9), sector que promueve un significativo consumo de insumos energéticos desde sus propios procesos. En este caso, en el contexto de formulación de una política pública, se debería considerar que se trata de un consumo que se origina en los requerimientos de insumos energéticos para el propio sector, antes que para abastecer la provisión al resto del sistema. En el resto de los sectores, considero que una intervención desde la política pública tendrá menos efectividad, por lo que no los analizo en este apartado.

Encadenamientos energéticos en Ecuador, 2010-2016

En esta sección analizo los cambios en la estructura de encadenamientos energéticos del Ecuador durante el periodo 2010-2016. Para ello, contrasto los resultados que corresponden a la aplicación del método de energía primaria incorporada y de unidades híbridas. Además, puesto que la estructura del sistema económico sirve de base para el cálculo de los encadenamientos energéticos desde el método de la energía primaria incorporada, en determinados aspectos también comparo estos resultados.

A partir de los indicadores obtenidos, identifico tres características de los encadenamientos energéticos.

1. A lo largo del periodo de estudio no existen cambios sustanciales en la estructura de los intercambios intersectoriales de la economía ecuatoriana y su sistema energético. Cuando contrasto la información interanual, veo que pocos sectores son reubicados respecto de su condición inicial de encadenamientos y algunos retornan a su clasificación inicial. Esto se nota con mayor claridad al analizar los resultados del método de energía primaria incorporada, aunque también, en menor grado, desde el modelo de

Gráfico 5.20. Encadenamientos propios y puros hacia adelante. MUH

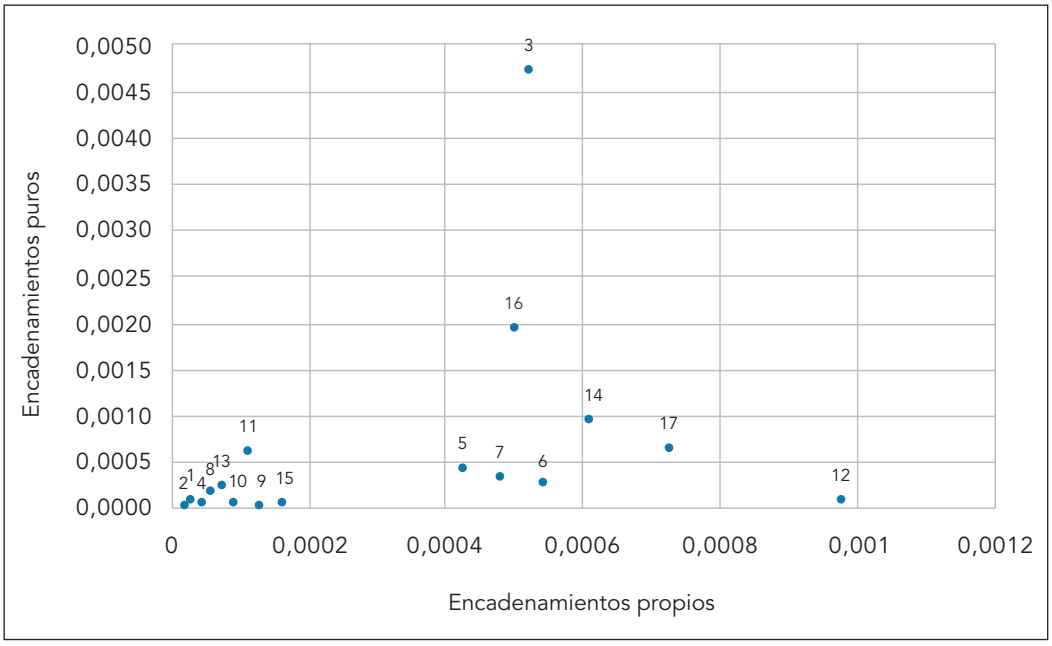
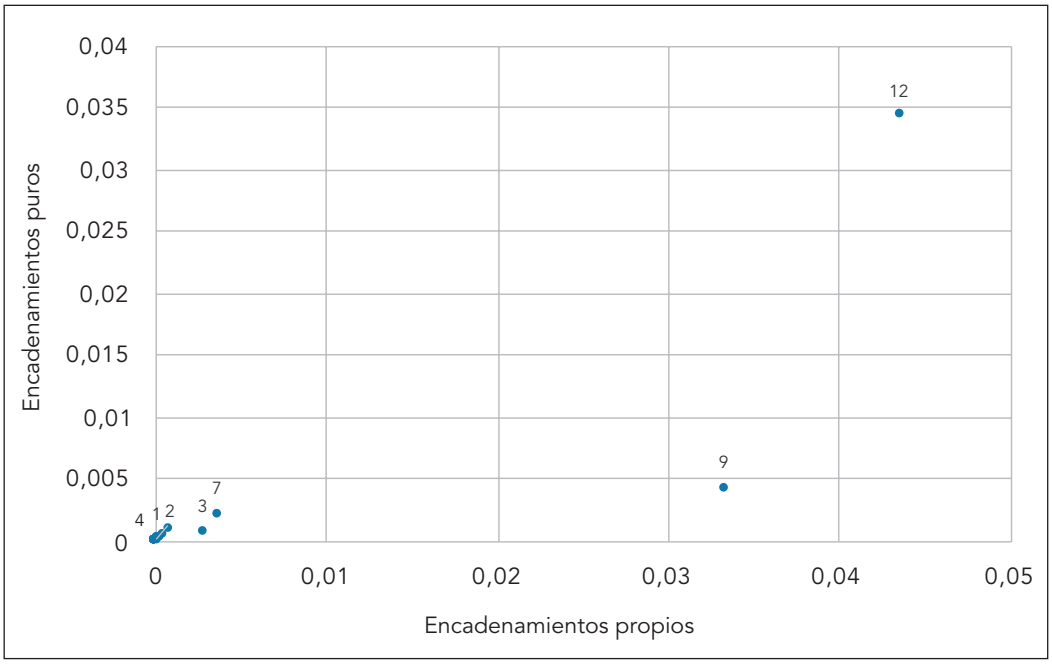


Gráfico 5.21. Encadenamientos propios y puros hacia atrás. MUH



Nota: para los gráficos 5.20 y 5.21: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado de petróleo y otros gases; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*, y (12) otras fuentes secundarias. Sectores no energéticos: (13) agro, pesca y minería; (14) industria; (15) construcción; (16) comercial, servicios, sector público, y (17) transporte y almacenamiento.

unidades híbridas, que evalúa un número reducido de sectores, por ende, los cambios son más notorios.
2. La estructura de los encadenamientos energéticos del modelo de energía primaria incorporada no necesariamente muestra correspondencia con la estructura de los intercambios económicos, a pesar de que estos son su base. Al convertir los flujos económicos en su equivalente energético, la estructura económica no necesariamente se traslada a la estructura energética.
3. Aunque los métodos de energía primaria incorporada y de unidades híbridas no son comparables, porque valoran un conjunto distinto de sectores, la evaluación de ambos es complementaria porque permite identificar y corroborar sectores prominentes en el consumo energético, que pueden requerir de una intervención a partir de políticas públicas para regularlos.

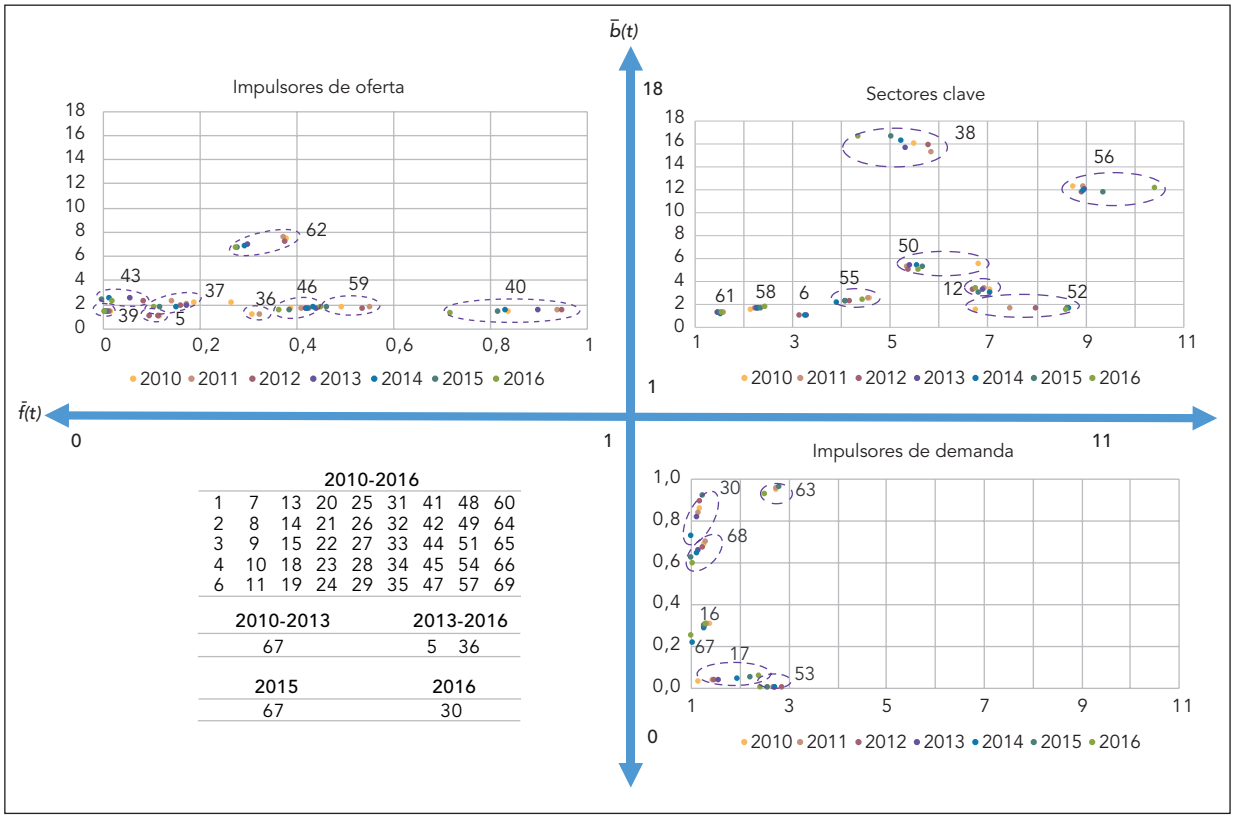
Los gráficos que presento a continuación contrastan en el eje de las abscisas los encadenamientos totales hacia adelante ($\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{t})$) y en el de las ordenadas los encadenamientos totales hacia atrás ($\bar{\mathbf{b}}(\mathbf{t})$); además de mostrar la evolución de estos indicadores durante el periodo 2010-2016. Ubico cuatro cuadrantes para representar a los sectores clave, los impulsores de demanda, los impulsores de oferta y los sectores independientes. Aquellas actividades con mayores conexiones hacia atrás y hacia adelante suelen definirse como sectores clave o de liderazgo porque su comportamiento puede impulsar el desarrollo de otras industrias dentro del sistema económico, estas se ubican en el primer cuadrante del plano cartesiano. En el segundo cuadrante se identifican impulsores de la demanda porque solamente son significativos sus encadenamientos hacia atrás. En el tercer cuadrante se localizan los sectores independientes, con bajos encadenamientos hacia adelante y hacia atrás. Finalmente, en el cuarto cuadrante se ubican los sectores que impulsan la oferta porque muestran significativos encadenamientos hacia adelante.

El método de energía primaria incorporada, 2010-2016

Desde este método, a lo largo del periodo de análisis, transporte y almacenamiento (56), fabricación de productos refinados de petróleo y de otros (38) y generación, captación y distribución de energía eléctrica (50) evidencian los indicadores de encadenamientos hacia atrás y hacia adelante más elevados (gráfico 5.22). Esto significa que la política pública que se enfoque en estas actividades permitirá promover cambios estructurales en el sistema energético nacional porque estos sectores movilizan la oferta y la demanda en el resto del sistema energético.

En cuanto a los sectores que impulsan la demanda, destacan las actividades de administración pública, defensa; planes de seguridad social obligatoria (63); comercio al por mayor y al por menor; servicios de reparación y mantenimiento de vehículos de motor y motocicletas (53); procesamiento y conservación de camarón (17), y elaboración de bebidas alcohólicas (30). Con vínculos hacia atrás significativos durante el periodo de estudio, cada unidad de energía adicional que se emplea en estos sectores intensificará

Gráfico 5.22. Clasificación sectorial por los intercambios energéticos. MEI



Nota: en el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

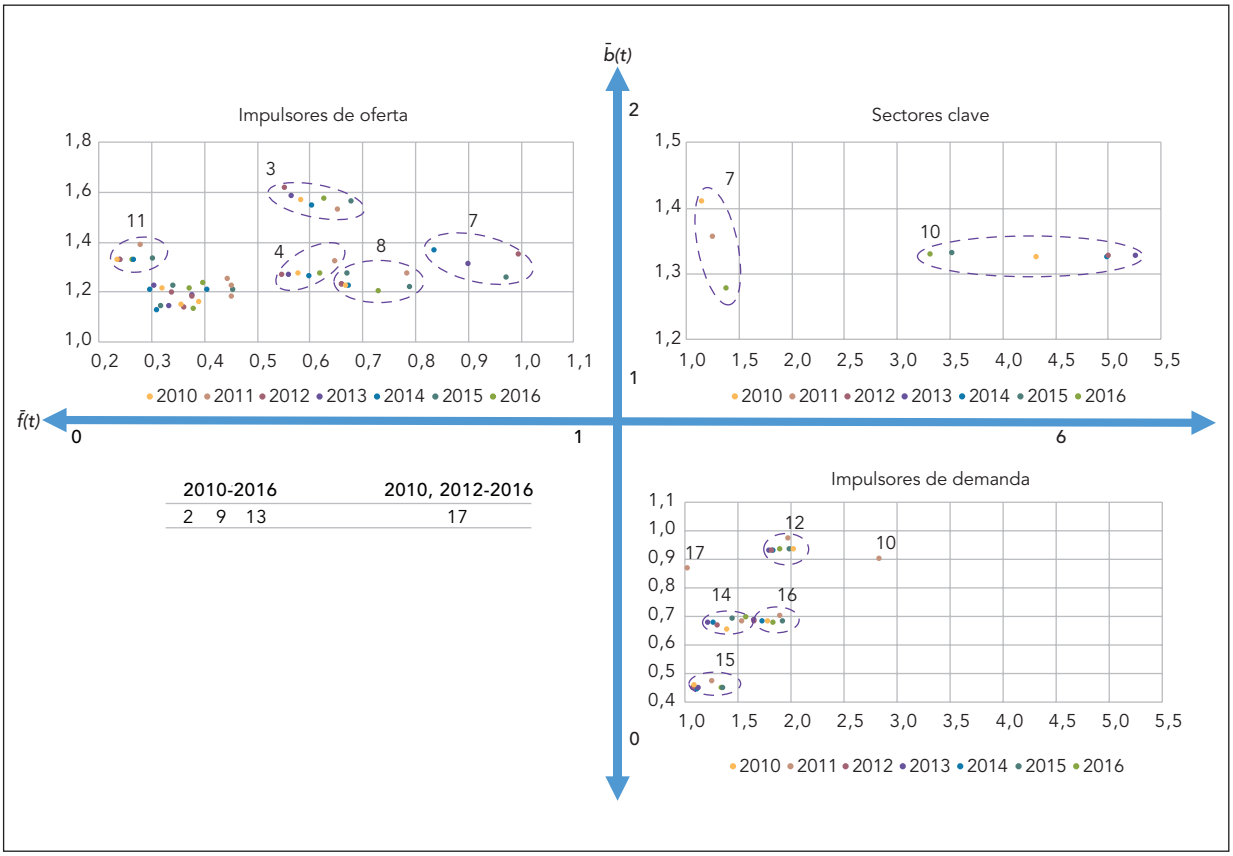
la actividad energética en el resto del sistema. Desde la política pública, el impulso a estos sectores puede tener implicaciones más importantes en términos de la demanda de energía.

Por último, los sectores de fabricación de otros productos químicos (40); actividades profesionales, técnicas y administrativas (62), y actividades de servicios financieros (59) se identifican como los principales impulsores de la oferta energética. Estas actividades, con elevados encadenamientos hacia adelante durante el periodo 2010-2016, muestran que cada unidad de energía que se ha empleado en estos sectores sirve de apoyo a la producción energética del resto de los sectores del sistema. Desde la política pública, la promoción de estos sectores tendrá importantes implicaciones desde la oferta de energía.

El método de unidades híbridas, 2010-2016

El análisis de los encadenamientos energéticos desde el método de unidades híbridas para el periodo 2010-2016 permite ratificar la fabricación de productos refinados de petróleo como un sector clave del sistema energético. En particular destacan el caso del *fuel oil* (7) y de otras energías secundarias (10), (gráfico 5.23).

Gráfico 5.23. Clasificación sectorial por los intercambios energéticos. MUH

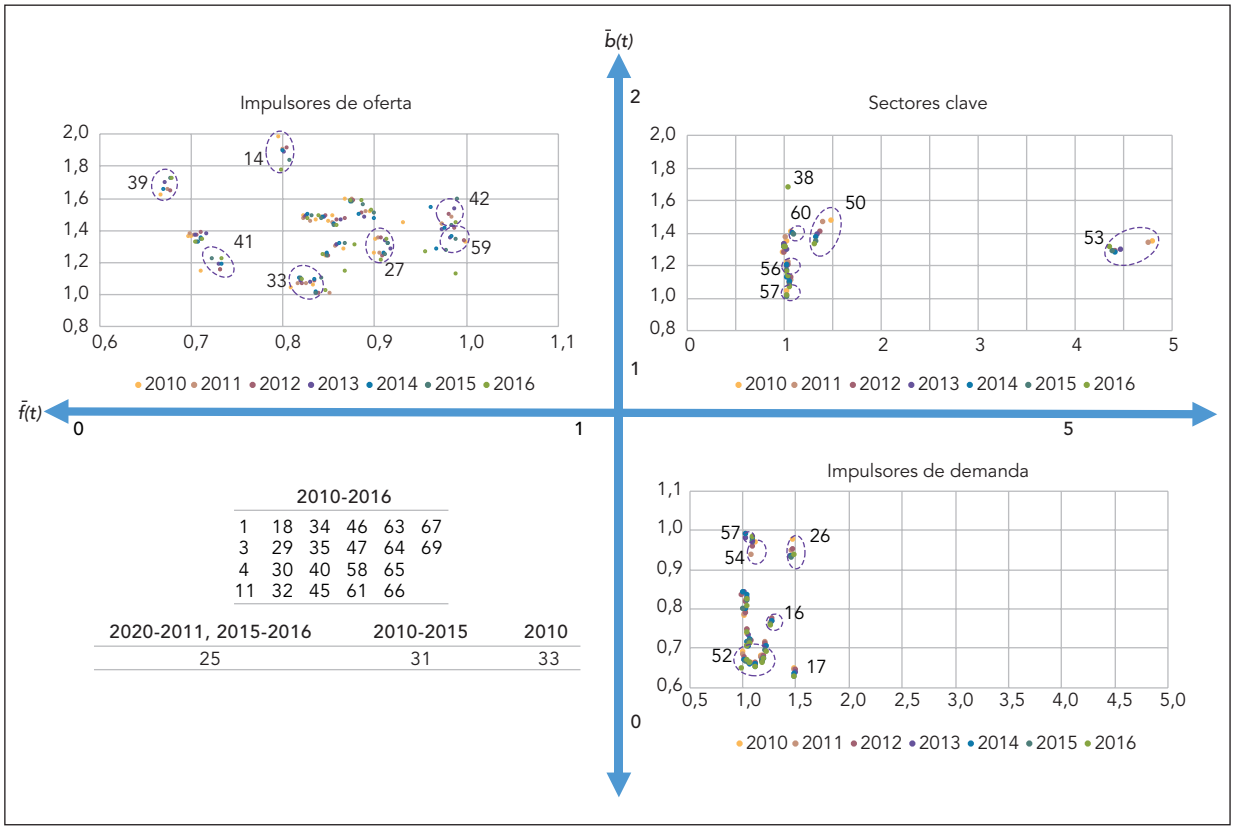


Nota: (1) petróleo; (2) gas natural; (3) caña de azúcar; (4) leña; (5) hidroenergía; (6) electricidad; (7) gas licuado de petróleo y otros gases; (8) gasolinas y alcoholes; (9) kerosene y *jet fuel*; (10) diésel; (11) *fuel oil*, y (12) otras fuentes secundarias. Sectores no energéticos: (13) agro, pesca y minería; (14) industria; (15) construcción; (16) comercial; servicios, sector público, y (17) transporte y almacenamiento.

Asimismo, como impulsores de la demanda se identifican durante la mayor parte del periodo 2010-2016 los sectores de electricidad (12) y comercial, servicios, sector público (16). En este caso, la categorización de actividades comerciales y de servicios coincide con los resultados del método de precios implícitos. El caso de la electricidad es diferente, pues se interpreta que en el sistema económico esta actividad es clave porque genera encadenamientos hacia adelante y hacia atrás. En cambio, desde la lectura del sistema energético, la generación de energía eléctrica impulsa fundamentalmente la demanda en el resto de los sectores del sistema.

Los sectores energéticos de *fuel oil* (7), kerosene y *jet fuel* (8), petróleo (3) y gas natural (4) constituyen impulsores de la oferta. Esta categorización es distinta de aquella que arroja el método de precios implícitos que, como he explicado, traduce el funcionamiento del sistema económico en unidades energéticas a través de una matriz o vector de precios implícitos. Esto implica que la promoción de estas fuentes primarias y secundarias de energía origina la movilización de la oferta energética en el resto de los sectores del sistema.

Gráfico 5.24. Clasificación sectorial por los intercambios económicos. MUH



Nota: en el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

Finalmente, es interesante identificar a los sectores que no generan vínculos energéticos con los demás durante la mayor parte del periodo de análisis que son leña (2), gas licuado y otros (9) y agro, pesca y minería (13). Se interpreta que estos sectores no promueven la oferta y tampoco la demanda de energía en el resto de las actividades, sino que operan de manera independiente al resto del sistema, por lo que las intervenciones de política pública generarán impactos en estos mismos sectores que no se transmitirán al resto del sistema.

Resultados económicos, 2010-2016

Los resultados de este análisis solamente pueden contrastarse con aquellos presentados en la sección 2.3.1. del método de precios implícitos. Se observa que los impulsores de intercambios económicos no necesariamente coinciden con los impulsores de los intercambios energéticos. Esto evidencia la necesidad de combinar siempre el análisis de la dimensión económica con su contraparte energética para realizar evaluaciones consistentes del sistema energético a partir del método de precios implícitos (gráfico 5.24).

Comentarios finales

En este capítulo proporciono una amplia visión de los diferentes indicadores de encadenamientos productivos y energéticos que se pueden analizar en un estudio de este tipo. En particular, resulta novedosa la construcción de indicadores para el modelo de unidades híbridas, los cuales son consistentes a pesar de que en este marco se manejan diferentes unidades de medida. Otro aspecto importante de este análisis es la categorización de los sectores económicos clave según sus encadenamientos hacia adelante y hacia atrás, así como también los sectores que funcionan como motor o base del sistema económico o del sistema energético. Finalmente, la identificación de los componentes puros y propios del sistema es fundamental en términos de política pública porque permite señalar los espacios en que sería más efectiva una intervención, sea por el consumo energético que se promueve en los propios procesos productivos o de transformación de un sector, o por el consumo que indirectamente se promueve en el resto del sistema.

Es necesario avanzar, sin embargo, hacia investigaciones sobre modelos de redes en donde las conexiones entre los elementos del sistema se pueden estudiar desde la lectura de las funciones ecológicas y sus implicaciones para los intercambios económicos. En este marco será posible identificar dependencias e interdependencias entre los componentes de un sistema y la dispersión de sus impactos.

Conclusiones

En este libro realizo un recorrido por diferentes métodos para construir matrices insumo-producto en términos físicos. ¿Para qué sirven estas herramientas de análisis? Esencialmente para comprender la estructura de los intercambios que tienen lugar en el interior de un sistema, en este caso, el sistema energético.

La forma básica de un análisis insumo-producto corresponde a un sistema de ecuaciones lineales. En este estudio, cada ecuación sirve para describir la distribución de las distintas formas de energía dentro del sistema económico o dentro del proceso de transformación en el sistema energético, según corresponda al estudio económico o físico que se realice.

Como explican Miller y Blair (2009), la lectura de la información que proporciona una matriz insumo-producto es de una "receta productiva" de cada sector económico en términos de los insumos provenientes de todos los sectores. Por ejemplo, cuando se analiza una de sus columnas, se dice que la producción de cada dólar de un sector requiere de una determinada composición en valor económico de sus ingredientes intermedios, más otros insumos no productivos, como la mano de obra y otros pagos a los factores de producción, que incluyen los impuestos. Asimismo, cuando se analiza la "receta energética" en una matriz insumo-producto de la transformación de la energía, se dice que la producción de cada fuente de energía secundaria requiere de una determinada composición de sus ingredientes energéticos intermedios medidos en unidades físicas.

En este marco de análisis se pueden estudiar los efectos directos e indirectos de posibles cambios en la demanda final. Se trata de impactos en el sistema económico y/o en el sistema energético que serán expresados tanto en términos de cambios en la oferta total como también en los flujos interindustriales que describe la matriz insumo-producto.

Los efectos directos se interpretan como aquellos que corresponden al primer vínculo intersectorial y, por ello, se miden en función de la matriz de coeficientes técnicos. Aplico este mismo concepto tanto para la matriz monetaria como para la matriz física o la de unidades híbridas.

Cuando se busca evaluar intercambios subsecuentes, se emplea en cambio la matriz inversa de Leontief porque expresa los efectos de una serie de intercambios posteriores, que se expresan matemáticamente como una serie geométrica de la suma de los efectos

directos hasta la n-ésima potencia. Es decir, de esta manera se evalúan efectos totales en el sistema, tanto directos como indirectos.

Estos elementos contribuyen a consolidar una vía de estudio del metabolismo social que se enfoca en el análisis de las interacciones en el interior del sistema económico, las cuales son descritas a partir de modelos insumo-producto en unidades físicas. Me enfoco en el estudio de la energía por la disponibilidad de información. No obstante, estos métodos pueden también aplicarse a otras descripciones de la naturaleza en otras unidades físicas, por ejemplo, para otros recursos naturales o para otras funciones ecológicas como la absorción de residuos.

El recorrido que he realizado a través de tres métodos específicos para construir matrices insumo-producto en términos físicos deja las siguientes lecciones e implicaciones.

En primer lugar, los métodos de precios implícitos y de unidades híbridas no muestran resultados comparables porque el sistema que se analiza es distinto. Cuando se desarrollan matrices insumo-producto físicas desde unidades híbridas, el sistema muestra a cada tipo de flujo en sus propias unidades de medida, es decir, desde la dimensión económica y/o ecológica que los caracteriza. El resultado de esta evaluación es, además, consistente con el principio termodinámico de conservación, aunque se parte de una matriz que por definición no muestra un balance idéntico entre los totales de filas y columnas.

Cuando se desarrollan matrices insumo-producto desde los precios implícitos, el resultado puede mostrar un rango de variación más amplio. Es decir, de acuerdo con la estructura de precios, se podrá caracterizar al sistema económico o al sistema natural, en este caso al sistema energético. No obstante, la disponibilidad de información será crucial para conseguir tales representaciones.

El intercambio económico puede proyectarse en unidades físicas a través de una estructura de precios. Generalmente por razones de disponibilidad de información, se emplean precios promedio sectoriales, en ese caso se trata de un modelo de precios homogéneos. El resultado de este análisis serán las unidades físicas que se corresponden en promedio al valor unitario sectorial. Por esta razón suele denominarse precios implícitos a estos valores unitarios. En lugar de describir el valor de mercado de los insumos o productos que se analizan, sirven para describir su valoración implícita al tipo de análisis que se realiza. El problema central con esta aplicación es que puede ser muy amplio el margen de incertidumbre asociado a los precios implícitos.

En el otro extremo, los modelos de precios implícitos pueden también reflejar la estructura de intercambios físicos. En mi análisis demostré que existe una estructura de precios que permite trasladar la información de la matriz insumo-producto monetaria a la de insumo-producto física de intercambios en el proceso de transformación energética. En particular, en el caso de la energía, se observa que la información reportada en los balances energéticos permite construir una base analítica apropiada para combinar el enfoque económico con el energético en un solo marco de análisis, a partir de una matriz de entradas y salidas de energía que se construye desde los intercambios en el proceso de transformación de la energía, la cual ha sido propuesta por Alcántara y Roca (1995), y que apliqué con pequeñas variaciones en un modelo que denomino de energía primaria incorporada.

Lo que resta por explicar es la consistencia de estos resultados conforme el principio termodinámico de conservación de la energía que siempre se cumple. Mi argumento, que rompe con la tradición crítica de la literatura hacia los modelos de precios implícitos, es que no existen razones que justifiquen inconsistencias en el cumplimiento de las condiciones termodinámicas en estos modelos, sino una interpretación inadecuada de sus resultados y, además, una omisión de los procedimientos de balanceo, necesarios para estructurar de manera adecuada una matriz de insumos y productos medida en unidades físicas.

En efecto, la matriz física que se deriva de los intercambios económicos deberá reflejar también en las cuentas de balance la realidad física detrás de esas transacciones. Esto quiere decir que se deberán tomar en consideración los insumos físicos que ingresan desde la naturaleza (extracción doméstica) o desde otras economías (importaciones) para alimentar las transacciones económicas, así como también las variaciones de inventarios de los recursos que se acumulan cada año en el sistema y las pérdidas en el proceso de transformación.

Estos tres factores no se modifican entre los modelos, económico y energético, porque muestran la disponibilidad de recursos existente, pero definitivamente los residuos resultantes del proceso de transformación de la energía serán distintos a los residuos que caracterizan la contraparte física del funcionamiento del sistema económico. Es decir, la cuantificación de los insumos netos del sistema, medidos en unidades físicas, deberá ser ajustada en el balance por la cantidad física de residuos que se hallan asociados a las transacciones económicas. Este es precisamente el ajuste que puede ser objeto de descuido u omisión en los estudios que se basan en el método de precios implícitos, también conocido como método de la intensidad energética o de la intensidad de recursos si se emplea otra unidad de medida.

Tras evaluar estos resultados, encuentro que el modelo de precios implícitos para estudiar los intercambios de insumos y productos en el interior del sistema económico ha evidenciado un notable atractivo desde el punto de vista de sus requerimientos de información, que son significativamente menores en comparación con otros métodos. No obstante, he demostrado que el manejo de los precios implícitos o de las intensidades energéticas en el modelo es una pieza clave para construir la información en unidades físicas. Este aspecto sin duda genera una enorme dosis de incertidumbre respecto de sus resultados debido a las posibilidades de garantizar una formulación correcta de precios que además no son explícitos. Por esta razón, considero que siempre será mejor partir de la construcción del sistema de análisis desde los propios intercambios físicos antes que desde la intermediación de un mecanismo de precios. Esto se logra desde la aplicación del modelo de unidades híbridas.

Ahora bien, ¿cuáles son las dificultades asociadas al desarrollo de un modelo de unidades híbridas? En lo fundamental se encuentra la enorme cantidad de información necesaria para establecer un sistema de intercambios sectoriales consistente, puesto que un esquema demasiado agregado es el origen de pérdidas de información relevante que desdibujan la caracterización del sistema. En este modelo este aspecto es clave porque los efectos directos e indirectos que resultan de una lectura agregada pueden mostrar diferencias

sustanciales en relación con un modelo desagregado en un mayor número de sectores de análisis, aunque no existan pérdidas en la consistencia interna del modelo respecto del cumplimiento del principio termodinámico de conservación.

Sobre el estudio de encadenamientos productivos, se trata de un mecanismo sugestivo de categorización sectorial que permite identificar sectores prioritarios para intervenir en políticas públicas. En esta evaluación es interesante observar la forma en la que algunos sectores desempeñan un rol clave, en términos de uso y provisión de recursos energéticos, y se hallan en condiciones de reproducir esta estructura directa e indirectamente en el resto de los sectores que componen el sistema, o al menos en un grupo de sectores que muestran precondiciones propicias para tal transmisión. Asimismo, se puede ver que los encadenamientos que se derivan de la aplicación del modelo de energía primaria incorporada no necesariamente replican los resultados de la estructura económica que tienen como base. Esto sucede porque este método se construye al combinar la matriz insumo-producto monetaria con una matriz física de entradas y salidas de energía en el proceso de transformación. El resultado en estas condiciones muestra menos incertidumbre sobre los precios implícitos, o si se quiere, se acerca más a un modelo de precios implícitos no homogéneos.

Con la sola aplicación de precios implícitos, en cambio, es de esperar que los encadenamientos calculados guarden similitudes con aquellos que se observan en el modelo económico insumo-producto. Este resultado parecería ser normal, dado que la base analítica de este modelo son valores físicos que comprenden múltiplos o fracciones de la matriz insumo-producto monetaria.

Finalmente, he demostrado que cuando los encadenamientos se calculan a partir del modelo de unidades híbridas, la condición de balance, la cual no es idéntica entre los totales de filas y columnas en la construcción de esta matriz, no supone un obstáculo para obtener resultados consistentes. En el último capítulo propongo resolver este problema a partir de los subtotales de los insumos asociados a cada una de las unidades de análisis. Esto resulta particularmente útil porque permite mantener la estructura híbrida característica del modelo y, al mismo tiempo, categorizar a los sectores según el tipo de encadenamientos que se originan en su propia estructura. Con este esquema se garantiza la consistencia de la información, que además tiene sentido porque se logra contrastar siempre unidades de medida uniformes. Desde esta perspectiva, sin embargo, los indicadores de encadenamientos y la categorización sectorial difieren significativamente respecto de los encadenamientos asociados al modelo de energía primaria incorporada, por ende, también difieren de los encadenamientos económicos y de aquellos que se obtienen a partir de precios implícitos. En particular, con estos últimos, la comparación que hago es solo indirecta, a través de los indicadores económicos, porque no calculo encadenamientos desde la matriz energética de precios implícitos homogéneos.

Las razones de estas discrepancias descansan en dos aspectos. El primero, que la base analítica de los modelos de energía primaria incorporada y de unidades híbridas es distinta. Mientras el primero combina una matriz económica y energética en una única unidad de medida, el segundo combina información económica y energética con sus propias unidades de medida. El segundo aspecto es que los encadenamientos desde el

método de unidades híbridas evalúan un total de 17 sectores, que incluyen actividades energéticas y económicas, mientras que los encadenamientos para el modelo de energía primaria incorporada se desarrollan para un total de 68 sectores.

A pesar de estas diferencias, una implicación importante de este análisis es que ambos esquemas serán complementarios en términos de política pública, porque a partir de sus resultados será posible identificar prioridades de intervención. En este caso sirve para promover cambios en la escala del consumo energético, mejoras en la eficiencia u otros propósitos de la política pública que pueden incluir la mitigación de impactos ambientales. Por ejemplo, para evaluar sectores de intervención por la emisión de GEI u otros contaminantes asociados a las actividades económicas que los originan, o las presiones ambientales por el uso de recursos materiales del sistema económico o su disposición en la naturaleza.

La aplicación de estos modelos e indicadores para la economía ecuatoriana durante el periodo 2010-2016 determina los siguientes hallazgos: las características del sistema energético ubican al petróleo como la principal fuente de energía del sistema ecuatoriano de transformación energética, mientras que los derivados de petróleo y la electricidad son los mayores consumidores de energía.

Desde el método de la energía incorporada, en el que se analiza un total de 12 sectores energéticos y 71 sectores económicos, se calcula un requerimiento directo de hasta 16 unidades de energía al año por cada unidad de energía que se halla disponible en el sistema. Los requerimientos totales ascienden hasta 31 unidades de energía por cada unidad disponible al incluir los requerimientos indirectos del sistema. La inversión energética del sistema para transformar fuentes primarias en secundarias se reduce durante el periodo de estudio, lo que podría interpretarse como evidencia de ciertos avances en términos de eficiencia energética. Esta información, sin embargo, permite hacer una lectura de los flujos energéticos del sistema económico que tiene como punto de partida los intercambios económicos del sistema, por lo que los resultados se derivan de una estructura de precios homogénea que reviste importantes limitaciones e ignora el tipo de retornos de escala que caracterizan al sistema energético.

Una lectura distinta se realiza a partir del método de unidades híbridas, esquema en el cual contrasto dos condiciones: retornos energéticos de escala constantes y decrecientes para un sistema compuesto por 17 sectores (12 energéticos y cinco económicos). Este marco de análisis, a diferencia del esquema de energía incorporada, cuenta con una estructura más agregada debido a la considerable cantidad de información que requiere la consolidación de las matrices anuales de intercambios económicos y energéticos en unidades económicas con su contraparte energética. En este caso, dentro de la matriz de requerimientos energéticos, predominan los intercambios del proceso de transformación, mientras que en el consumo final tienen mayor peso los sectores energéticos en relación con los económicos.

El supuesto de retornos energéticos de escala constantes en el método de unidades híbridas determina resultados que no reflejan pérdidas de eficiencia en el sistema, aunque sí pueden estimarse pérdidas o rendimientos energéticos en el proceso de transformación. Considero más realistas los resultados del esquema con retornos energéticos de escala decrecientes, que introducen pérdidas o ganancias en el sistema de intercambios, adicionales

a las pérdidas o ganancias que se registran en el proceso de transformación. Las pérdidas tienen lugar cuando se invierte más energía primaria en relación con la energía secundaria que se produce, y la situación opuesta permite medir los rendimientos o ganancias energéticas; ambas opciones se contabilizan en estas aplicaciones.

Durante el periodo 2010-2016 se identifica a partir de este modelo que la economía ecuatoriana pasó de requerir un total de 490 a 550 bep por cada 1000 dólares (medidos a precios de 2007) que movilizó el sistema en un contexto de eficiencia energética. Cuando se introducen pérdidas, el salto en las necesidades de energía es de 530 a 574 bep por cada 1000 dólares (de 2007), entre los años 2010 y 2016. Es decir, durante el periodo de análisis existe un aumento en los requerimientos energéticos de la economía ecuatoriana por cada dólar que se emplea en el sistema. Este aumento requiere el 53 % de un barril equivalente de petróleo (bep)[1] por cada dólar en 2010 a 57 % de un bep por cada dólar en 2016 y en el contexto de menor eficiencia energética. Estos valores resultan ser más elevados que aquellos que se obtienen al aplicar el método de precios implícitos, porque en este caso se evidencian los requerimientos energéticos de la transformación de fuentes primarias en secundarias, procesos que retroalimentan al sistema económico y, además, se incorporan los requerimientos energéticos del propio sistema económico.

Desde el método de precios implícitos con 17 sectores (12 de los cuales son energéticos y los demás económicos) se calculan requerimientos totales de energía que se incrementaron desde 256 a 329 bep por cada 1000 dólares (a precios de 2007) que se utilizaron en el sistema en 2010 y 2016, respectivamente, bajo un esquema de precios no homogéneos. En cambio, desde un esquema de precios implícitos homogéneos el sistema requirió 300 y 344 bep por cada 1000 dólares en 2010 y 2016. Como he explicado, estas cifras no son comparables a las que deriva el método de unidades híbridas porque solamente reflejan los requerimientos energéticos del sistema económico, que contabilizan un mínimo de 26 % y máximo de 34 % de un bep por cada dólar empleado entre 2010 y 2016.

Un aspecto por destacar de este análisis es que el grado de agregación de la información resulta ser relevante para los resultados. La aplicación del mismo modelo cuando la información sectorial se halla agregada deriva una diferencia sustancial, en un factor de hasta seis a uno, así como también distorsiones en la composición de los flujos, lo que puede ser limitante no solo en términos analíticos, sino también en la definición apropiada de políticas públicas alrededor de las intensidades energéticas que caracterizan a los distintos sectores.

Por último, destaco las recomendaciones en términos de intervenciones de política pública que se derivan de los indicadores de encadenamientos sectoriales hacia adelante y hacia atrás que calculo en este trabajo. Para este efecto, categorizo los sectores económicos y energéticos analizados en cuatro tipos: sectores clave, impulsores de demanda, impulsores de oferta e independientes. Desde una perspectiva de política pública, se pueden esperar cambios estructurales en el sistema cuando se promuevan intervenciones en aquellas actividades que se identifican como sectores clave. En estos casos se evidencia que estos sectores movilizan la oferta y la demanda de energía en el resto del

[1] Hay que recordar que cada bep representa la energía liberada durante la quema de un barril de petróleo crudo.

sistema. Los resultados del método de precios implícitos coinciden con los de unidades híbridas en situar a la fabricación de productos refinados de petróleo en esta categoría.

Asimismo, la evidencia de altos encadenamientos hacia atrás define a los sectores que impulsan la demanda energética del sistema. La política pública, en este caso, podría centrarse en el sector comercial y de servicios porque se identifica que, tanto desde el sistema energético como desde el económico, este promueve una movilización importante en los requerimientos energéticos del resto de las actividades económicas y energéticas del sistema.

Como impulsores de la oferta hay dos perspectivas de política pública que pudieran evaluarse. Por una parte, cuando el interés central se encuentre en la intervención en los procesos de transformación de la energía, son las fuentes primarias y secundarias las que originan una movilización sustancial en la oferta energética del resto de las actividades del sistema como petróleo, gas natural, *fuel oil*, kerosene y *jet fuel*. Por otra parte, cuando el interés principal sea la intervención en las actividades económicas que afectan la oferta energética del resto del sistema, las acciones de la política pública deberían enfocarse en la fabricación de productos químicos; las actividades profesionales, técnicas y administrativas y en las actividades de servicios financieros.

Espero haber cumplido con mi propósito de enseñar la aplicación consistente de los principales métodos de construcción de cuentas ambientales desde una perspectiva insumo-producto. Además, considero que el caso ecuatoriano ha sido ilustrativo de las interdependencias sociometabólicas, por su condición altamente especializada en la explotación de recursos naturales y el escaso desarrollo industrial. De esta manera, considero que ha sido un caso propicio para observar el alcance de estos métodos, porque ha permitido dimensionar en unidades físicas la estructura de los intercambios económicos y sirve de base para el desarrollo de otras líneas de investigación, no solo a escala nacional, sino también comparaciones dentro de la realidad sudamericana o latinoamericana.

Algunas líneas potenciales de investigaciones futuras corresponden al desarrollo de descomposiciones, análisis de redes ecológicas o la propia desagregación de la escala espacial de análisis tanto hacia la escala local como global. Como resultado de estos estudios, en una primera línea se espera profundizar en la caracterización del sistema energético nacional. Para ello, hay que entender la descomposición de los efectos estructurales, por ejemplo, entre distintos periodos de análisis; o explorar la estructura y funciones de la red ecológica asociada a las matrices insumo-producto físicas para caracterizar el funcionamiento sociometabólico del sistema económico.

Una segunda línea puede avanzar hacia investigaciones sobre modelos de redes en donde las conexiones entre los elementos del sistema se pueden estudiar desde otros elementos. En particular, los métodos de redes ecológicas se basan en una analogía entre los sistemas sociales y los ecosistemas, útil para comprender, desde la lectura de las funciones ecológicas, las características de los sistemas sociales y sus interacciones. Todo esto en el marco de una red que se concibe desde la conceptualización de una cadena trófica por la que es posible observar los distintos grados de dependencia entre los componentes del sistema, tanto desde la perspectiva de los proveedores de insumos naturales, sean estos

materiales o energéticos, como desde los consumidores que dispersan sus efectos en el resto del sistema con variada intensidad.

Una tercera vía de análisis que se puede explorar son las relaciones entre los resultados del análisis de matrices insumo-producto físicas con los balances de materiales. Una asociación entre los materiales extraídos, consumidos, exportados, importados, o hasta desechados por cada unidad energética que se emplea sectorialmente, puede servir como base analítica de los vínculos entre estas dos diferentes metodologías. De esta forma, aunque el balance de materiales de una economía o de otra escala parece ser una estructura poco flexible para el análisis, sería posible tender un puente con la información de los insumos y productos energéticos, para crear escenarios diversos de análisis sobre la carga material asociada a determinadas propuestas de transición energética. Otros aspectos comprenderán el estudio de las condiciones de intercambio ecológicamente desigual, tanto en el ámbito local como en el ámbito del comercio internacional, posiblemente también a partir de la conexión entre los balances de materiales y los resultados de las matrices insumo-producto energéticas.

Referencias

Alcántara, Vicent. 2007. "Análisis input-output y emisiones de CO_2 en España: Un primer análisis para la determinación de sectores clave en la emisión". Working Papers 07.02 Department of Applied Economics at Universitat Autònoma of Barcelona. https://bit.ly/3tSNbtz

Alcántara, Vicent, y Jordi Roca. 1995. "Energy and CO_2 emissions in Spain: Methodology of analysis and some results for 1980-1990". *Energy Economics* 17 (3): 221-230. https://doi.org/10.1016/0140-9883(95)00014-L

— 2004. "Consumo energético y actividad económica: Sobre el uso de los balances energéticos desde una perspectiva input-output". En *Cuentas ambientales y actividad económica*, editado por Pablo Campos y José María Casado, 1ª ed., 155-70. Madrid.

Alcántara, Vicent, Pablo del Río y Felix Hernández. 2010. "Structural analysis of electricity consumption by productive sectors: The Spanish case". *Energy* 35 (5): 2088-2098. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.027

Alcántara, Vicent, Emilio Padilla y Matías Piaggio. 2017. "Nitrogen oxide emissions and productive structure in Spain: An input-output perspective". *Journal of Cleaner Production* 141 (enero): 420-428. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.088

Auty, Richard. 1985. "Materials intensity of GDP: Research issues on the measurement and explanation of change". *Resources Policy* 11 (4): 275-283. https://doi.org/10.1016/0301-4207(85)90045-5

Ayres, Roberto U., y Allen V. Kneese. 1969. "Production, Consumption and Externalities". *The American Economic Review* 59 (3): 282-296. https://www.jstor.org/stable/1808958

BCE (Banco Central del Ecuador). 2014. *Medición del PIB por el enfoque del ingreso*. https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/CuentasNacionales/DRT986.pdf

— 2016. "Tablas de utilización segundo nivel". https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/CuentasNacionalesAnuales.html

— 2019. "Matriz insumo-producto. Nota metodológica". https://www.bce.fin.ec/index.php/boletines-de-prensa-archivo/item/1412-banco-central-presenta-la-matriz-insumo-producto-del-ano-2019

Beyers, William. 1976. "Empirical Identification of Key Sectors: Some Further Evidence". *Environment and Planning A: Economy and Space* 8 (2): 231-236. https://doi.org/10.1068/a080231

Boundi Chakri, Fahd. 2016. "Análisis input-output de encadenamientos productivos y sectores clave en la economía mexicana". *Revista Finanzas y Política Económica* 8 (1): 55-81. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5420616.pdf

Bicknell, Kathryn B., Richard J. Ball, Ross Cullen y Hugh R. Bigsby. 1998. "New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy". *Ecological Economics* 27 (2): 149-160,

Buenaño, Edwin Vladimir. 2017. "Actividad económica y emisiones de CO_2: Ensayos empíricos para el Ecuador". Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. http://hdl.handle.net/10803/457437

Bullard, Clark W., y Robert A. Herendeen. 1975. "The energy cost of goods and services". *Energy Policy* 3 (4): 268-278. https://doi.org/10.1016/0301-4215(75)90035-X

Caicedo, Maribel, María Cristina Vallejo y Fernando Carrasco. 2019. "La pobreza como determinante del consumo doméstico de leña y su efecto en los bosques del Ecuador". *Bosque 40* (2): 205-216. https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000200205

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) y BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2019. *Eficiencia energética en América Latina y El Caribe: Avances y oportunidades*. S/l. BID. http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0397.pdf

Chapman, Peter. 1973. "Energy and the World Modelling". Seminar Report presentado en OU Energy Research Group, Milton Keynes, Bucks, mayo.

— 1974. "Energy costs: A review of methods". *Energy Policy* 2 (2): 91-103. https://doi.org/10.1016/0301-4215(74)90002-0.

Chen, Chia-Yon, y Adam Rose. 1991. "The Absolute and Relative Joint Stability of Input-Output Production and Allocation Coefficients". En *Advances in Input-Output Analysis*, 25-36. Nueva York: Oxford University Press.

Chenery, Hollis B., y Tsunehiko Watanabe. 1958. "International Comparisons of the Structure of Productions". *The Econometrica Society* 26 (4): 487-521. https://doi.org/10.2307/1907514

Cleveland, Cutler J., y Matthias Ruth. 1999. "Indicators of Dematerialization and the Materials Intensity of the Use". *Journal of Industrial Ecology* 2 (3): 15-50. https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.3.15

Crespo-Marín, Zulma, y Mario Pérez-Rincón. 2019. "El metabolismo social en las economías andinas y centroamericanas, 1970-2013". *Sociedad y Economía* 36: 53-81. https://doi.org/10.25100/sye.v0i36.5866

Daly, Herman. 1968. "On Economics as Life Science". *Journal of Political Economy* 76 (3): 392-406. http://www.jstor.org/stable/1829303

De Bruyn, Sander M. 2000. *Economic Growth and the Environment: An Empirical Analysis*. Dordrecht: Springer.

Dietzenbacher, Erik. 1989. "On the Relationship between the Supply-Driven and Demand Driven Input-Output Models". *Environment and Planning A: Economy and Space* 21 (11): 1533-1539. https://doi.org/10.1068/a211533.

Dietzenbacher, Erik, y Jesper Stage. 2006. "Mixing oil and water? Using hybrid input-output tables in a structural decomposition analysis". *Economic Systems Research* 18 (1): 85-95. https://doi.org/10.1080/09535310500440803

Dietzenbacher, Erik, Stefan Giljum, Klaus Hubacek y Sangwon Suh. 2009. "Physical Input-Output Analysis and Disposals to Nature". En: *Handbook of input-output economics in industrial ecology,* editado por Sangwon, Suh, 123-137. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5737-3_7

Dinda, Soumyananda. 2004. "Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A survey". *Ecological Economics* 49 (4): 431-455. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011.

Duarte, Rosa., Julio Sánchez-Chóliz, Jorge Bielsa. 2002. "Water use in the Spanish economy: an input–output approach". *Ecological Economics,* 43: 71-85. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00183-0

Duchin, Faye. 1998. *Structural economics: Measuring Change in Technology Lifestyles, and the Environment.* Washington DC: Island Press.

— 2009. "Input-output Economics and the Physical World". En *Handbook of input-output economics in industrial ecology*, editado por Sangwon Suh, 23-42. Dordrecht: Springer.

Duchin, Faye, y Glenn-Marie Lange. 1994. *The Future of the Environment: Ecological Economics & Technological Change*. Con Knut Thonstad y Annemarth Idenburg. Nueva York: Oxford University Press.

Eisenmenger, Nina, Jesús Ramos-Martín y Heinz Schandl. 2007. "Análisis del metabolismo energético y de materiales de Brasil, Chile y Venezuela". *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 6: 17-39. https://www.raco.cat/index.php/Revibec/article/view/73174

European Commission y Eurostat. 2001. *Economy-wide material flow accounts and derived indicators: A methodological guide*. Theme 2 *Economy and finance*. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities.

Ferng, Jiun-Jiun. 2001. "Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity". *Ecological Economics* 37 (2): 159-172. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00292-5

— 2002. "Toward a scenario analysis framework for energy footprints". *Ecological Economics* 40 (1): 53-69. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00270-1

Fischer-Kowalski, Marina. 1998. "Society's Metabolism: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860-1870". *Journal of Industrial Ecology* 2 (1): 61-78. https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.61

Fischer-Kowalski, Marina, y Walter Hüttler. 1998. "Society's Metabolism: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998,". *Journal of Industrial Ecology* 2 (4): 107-136. https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.4.107

Georgescu-Roegen, Nicholas. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge MA: Harvard University Press.

Gerber, Julien-François, y Arnim Scheidel. 2018. "In Search of Substantive Economics: Comparing Today's Two Major Socio-metabolic Approaches to the Economy-MEFA and MuSIASEM". *Ecological Economics* 114 (C): 186-194. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.012

Ghosh, Ambica. 1958. "Input-Output Approach to an Allocation System". *Economica* 25: 58-64. https://doi.org/10.2307/2550694

Giampietro, Mario. 2006. "Comments on 'The Energetic Metabolism of the European Union and the United States' by Haberl and colleagues: Theoretical and Practical Considerations on the Meaning and Usefulness of Traditional Energy Analysis". *Journal of Industrial Ecology* 10 (4): 173-185. https://doi.org/10.1162/jiec.2006.10.4.173

Giampietro, Mario, y Kozo Mayumi. 2000. "Multiple-Scale Integrated Assessments of Societal Metabolism: Integrating Biophysical and Economic Representations Across Scales". *Population and Environment* 22: 155-210. https://doi.org/10.1023/A:1026643707370

Giljum, Stefan. 2004. "Trade, Materials Flows, and Economic Development in the South: The Example of Chile". *Journal of Industrial Ecology* 8 (1-2): 241-261. https://doi.org/10.1162/1088198041269418

González-Martínez, Ana Citlalic y Heinz Schandl. 2008. "The biophysical perspective of a middle income economy: Material flows in Mexico". *Ecological Economics* 68 (1-2): 317-327. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.013

Greyl, Lucie, Sara Vegni, Maddalena Natalicchio y Jessica Ferretti. 2013. "High-speed Transport Infraestructure (TAV) in Italy". En *Ecological Economics from the Ground Up*, editado por Hali Healy, Joan Martínez-Alier, Leah Temper, Mariana Walter, Julien-François Gerber, 110-139. Londres: Routledge.

Griffin, James M. 1976. "Energy input-output modelling: Problems and prospects". Final Report. EPRI EA-298 (Research Project 208-1). Center for Energy Systems, General Electric Co., Washington DC. https://www.osti.gov/servlets/purl/7314063

Guitton, Henri. 1957. "Norregaard Rasmussen (P.) Studies in Inter-Sectoral Relations". *Revue Économique* 8 (6): 1103-1104. https://www.persee.fr/doc/reco_0035-2764_1957_num_8_6_407279_t1_1103_0000_001

Gutiérrez, María Jesús, Miguel Tarancón, Pablo del Río y Vicent Alcántara. 2018. "Analysing the drivers of the intensity of electricity consumption of non-residential sectors in Europe". *Applied Energy* 211 (febrero): 743-754. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.115

Hall, Charles A. S., Stephen B. Balogh y David J. R. Murphy. 2009. "What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?" *Energies* 2 (10): 25-47. https://doi.org/10.3390/en20100025

Hall, Charles A. S., Jessica G. Lambert y Stephen B. Balogh. 2014. "EROI of different fuels and the implications for society". *Energy Policy* 64 (enero): 141-152. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049

Harrigan, Frank, y James McGilvray. 1988. "The Measurement of Interindustry Linkag". *Ricerche Economiche* 42: 325-343.

Hawkins, Troy, Chris Hendrickson, Cortney Higgins, H. Scott Matthews y Sangwon Suh. 2007. "A mixed-Unit Input-Output Model for Environmental Life-Cycle Assessment and Material Flows Analysis". *Environmental Science and Technology* 41 (3): 1024-1031. https://doi.org/10.1021/es060871u

Herendeen, Robert A. 1974. "Affluence and Energy Demand". *ASME Journal of Mechanical Engineers* 96 (10): 18-22.

Hoekstra, Rutger. 2003. "Structural change of the physical economy: Decomposition analysis of physical and hybrid input-unid input-output tables". Tesis doctoral, Free University.

Hoekstra, Rutger, y Jeroen C. J. M. van den Bergh. 2002. "Structural Decomposition Analysis of Physical Flows in the Economy". *Environmental and Resource Economics* 23: 357-378. https://doi.org/10.1023/A:1021234216845

Hubacek, Klaus, y Laixing Sun. 2001. "A scenario analysis of China's land use and land cover change: Incorporating biophysical information into input-output modelling". *Structural Change and Economic Dynamics* 12 (4): 367-397. https://doi.org/10.1016/S0954-349X(01)00029-7

Hubacek, Klaus, y Stefan Giljum. 2003. "Applying physical input-output analysis to estimate land appropiation (ecological footprints) of international trade activities". *Ecological Economics* 44 (1): 137-151. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00257-4

IEA (International Energy Agency). 2019. "Central and South America energy consumption". Acceso el 13 de abril de 2020. https://www.iea.org/regions/central-south-america.

Imori, Denise, y Joaquim Guilhoto. 2010. "Estrutura produtiva brasileira e emissao de CO_2". En *Economia socioambiental*, organizado por José Eli da Veiga, 205-233. Sao Paulo: SENAC.

Infante-Amate, Juan, Manuel González de Molina y Víctor M. Toledo. 2017. "El metabolismo social: Historia, métodos y principales aportaciones". *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 27: 130-152. https://redibec.org/wp-content/uploads/2018/01/rev27-11-corregido.pdf

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. "2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories". Reporte editado por H. S. Eggleston, L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe, National Greenhouse Gas Inventories Programme, Japón.

Isard, Walter. 1969. "Some notes on the linkage of ecologic and economic systems". *Papers in Regional Science* 22 (1): 85-96. https://doi.org/10.1007/BF01941166

Jevons, William Stanley. 1865. *The Coal Question: An Inquiry Concerning The Progress of The Nation, and The Probable Exhaustion of Our Coal Mines*. Londres: Macmillan.

Jones, Leroy P. 1976. "The Measurement of Hirschmanian Linkages". *Quaterly Journal of Economics* 90 (2): 323-333. https://doi.org/10.2307/1884635

Kemp-Benedict, Eric. 2018. "Dematerialization, Decoupling, and Productivity Change". *Ecological Economics* 150: 204-216. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.020

Kissinger, Meidad, y William E. Rees. 2010. "An interregional ecological approach for modelling sustainability in globalizing world: Reviewing existing approaches and emerging directions". *Ecological Modelling* 221 (21): 2615-2623. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.07.003

Konijn, Paul, Sake de Boer y Jan van Dalen. 1997. "Input-output analysis of material flows with applications to iron, steel and zinc". *Structural Change and Economic Dynamics* 8 (1): 129-153. https://doi.org/10.1016/S0954-349X(96)00063-X

Krenz, Jerrold H. 1974. "Energy per Dollar Value of Consumer Goods and Services". *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics* SMC-4 (4): 386-388. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5408460

Lambert, Jessica G., Charles Hall A. S., Stephen B. Balogh, Ajay Gupta y Michelle Arnold. 2014. "Energy, EROI and quality of life". *Energy Policy* 64: 153-167. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001.

Latouche, Serge. 2008. *La apuesta por el decrecimiento: ¿Cómo salir del imaginario dominante?* Barcelona: Icaria.

Laumas, Prem S. 1976. "The Weighting Problem in Testing the Linkage Hypothesis". *Quarterly Journal of Economics* 90 (2): 308-312. https://doi.org/10.2307/1884632

Lennox, James A., Graham Turner, Rob Hoffman y Berth McInnis. 2004. "Modeling Basic Industries in the Australian Stocks and Flows Framework". *Journal of Industrial Ecology* 8 (4): 101-120. https://doi.org/10.1162/1088198043630513

Lenzen, Manfred. 2011. "Aggregation versus disaggregation in input-output analysis of the environment". *Economic Systems Research* 23 (1): 73-89. https://doi.org/10.1080/09535314.2010.548793

Leontief, Wassily. 1970. "Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach". *The Review of Economics and Statics* 52 (3): 262-271. https://doi.org/10.2307/1926294

Lifset, Reid. 2009. "Industrial Ecology in the Age of Input-Output Analysis". En *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, editado por Sangwon Suh, 3-21. Dordrecht: Springer.

López, Pablo. 2016. *Planeta eficiente, planeta consciente. Eficiencia energética y desarrollo sostenible.* Cuenca: WWF, OLADE, INTI. DOI: 10.13140/RG.2.2.29788.13440

Machado, Giovani, Roberto Schaeffer y Ernst Worrell. 2001. "Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: An input-output approach". *Ecological Economics* 39 (3): 409-424. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00230-0

Martínez-Alier, Joan. 2005. *El ecologismo de los pobres: Conflictos ambientales y lenguajes de valoración*. 3.ª ed. Barcelona: Icaria.

—. 2007. "El ecologismo popular". *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente* 16 (3): 148-151. https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/121/118

Mattey, Joe, y Thijs Ten Raa. 1997. "Primary versus secondary production techniques in U.S. Manufacturing". *Review of Income and Wealth* 43 (4): 449-464. https://doi.org/10.1111/j.1475-4991.1997.tb00235.x

Merciai, Stefano, y Reinout Heijungs. 2014. "Balance issues in monetary input-output tables". *Ecological Economics* 102: 69-74. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.03.016

Miller, Ronald E. 1989. "Stability of Supply Coefficients and Consistency of Supply-Driven and Demand-Driven Input-Output Models: A Comment". *Environment and Planning A: Economy and Space* 21: 1113-1120. https://doi.org/10.1068/a211113

Miller, Ronald E., y Peter D. Blair. 2009. *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. 2.a ed. Nueva York: Cambridge University Press.

Murphy, Ryan O., Amnon Rapoport y James E. Parco. 2004. "Population Learning of Cooperative Behavior in a Three-Person Centipede Game". *Rationality and Society* 16 (1): 91-120. https://doi.org/0.1177/1043463104039876.

Nakamura, Shinichiro, y Yasushi Kondo. 2009. *Waste Input Output Analysis: Concepts and Application to Industrial Ecology*. Dordrecht: Springer.

OLADE (Organización Latinoamericana de Energía). 2016. "Balances energéticos". Acceso el 21 de enero de 2020. http://sielac.olade.org/WebForms/Reportes/InfogramaBalanceEnergeticoSimplificado.aspx?or=545&ss=2&v=3

— 2017. *Manual de estadística energética*. Quito: OLADE.

— 2020. Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe (sieLAC). Acceso el 21 de enero de 2020. https://sielac.olade.org/

Pérez-Manrique, Pedro Luis, Julien Brun, Ana Citlalic González-Martínez, Mariana Walter y Joan Martínez-Alier. 2013. "The Biophysical Performance of Argentina (1970-2009)". *Journal of Industrial Ecology* 17 (4): 590-604. https://doi.org/doi.org/10.1111/jiec.12027

Pérez-Rincón, Mario, Julieth Vargas-Morales y Zulma Crespo-Marín. 2018. "Trends in social metabolism and environmental conflicts in four Andean countries from 1970 to 2013". *Sustainability Science* 13 (3): 635-648. https://doi.org/10.1007/s11625-017-0510-9

Piaggio, Matías. 2013. "From global to local behind the relationship between the economy and the environment". Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. http://hdl.handle.net/10803/121585

Proops, J. L. R. 1977. "Input-output analysis and energy intensities: A comparison of some methodologies". *Applied Mathematical Modelling* 1 (4): 181-186. https://doi.org/10.1016/0307-904X(77)90003-8

Recalde, Marina, y Jesús Ramos-Martín. 2012. "Going beyond energy intensity to understand the energy metabolism of nations: The case of Argentina". *Energy* 37 (1): 122-132. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.011

Reijnders, Lucas. 1998. "The Factor X Debate: Setting Targets for Eco-Efficiency". *Journal of Industrial Ecology* 2 (1): 13-22. https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.13

Rose, Adam, y Tim Allison. 1989. "On the Plausibility of the Supply-Driven Input-Output Model: Empirical Evidence on Joint Stability". *Journal of Regional Science* 29 (3): 451-458. https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1989.tb01390.x

Russi, Daniela, Ana Citlalic González-Martínez, Giljum Stefan, Joan Martínez-Alier y María Cristina Vallejo. 2008. "Material Flows in Latin America: A comparative analysis of Chile, Ecuador, Mexico, and Peru, 1980-2000". *Journal of Industrial Ecology* 12 (5-6): 704-720. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00074.x

Schmidt-Bleek, Friedrich. 1993. *The Fossil Makers*, traducido por Reuben Deumling. Berkeley: Factor 10 Institute. http://www.factor10-institute.org/files/the_fossil_makers/FossilMakers_Intro.pdf

Schmidt, Gavin A., Reto A. Ruedy, Ron L. Miller y Andy Lacis. 2010. "The attribution of the present-day total greenhouse effect". *Journal Geophysical Research*. 115 (D20): 1-6. https://doi.org/10.1029/2010JD014287

Schuschny, Andrés Ricardo. 2005. "Tópicos sobre el modelo de insumo-producto: Teoría y aplicaciones". División de Estadísticas y Proyecciones Económicas, Serie Estudios Estadísticos y Prospectivos, n.º 37, Santiago de Chile, Naciones Unidas. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/4737/S0501011_es.pdf

Strout, Alan. 1967. "Technological Change and U.S. Energy Consumption". Tesis doctoral, University of Chicago.

Su, Bin, y B. W. Ang. 2012. "Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological developments". *Energy Economics* 34: 177-188. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.10.009.

Suh, Sangwon. 2004. "A note on the calculus for physical input-output analysis and its application to land appropriation of international trade activities". *Ecological Economics* 48 (1): 9-17. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.003

Suh, Sangwon, y Shigemi Kagawa. 2009. "Industrial Ecology and Input-Output Economics: A Brief History". En *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, editado por Suh Sangwon, 43-58. Londres: Springer.

Towa, Edgar, Vanessa Zeller y Wouter Achten. 2000. "Input-output models and waste management analysis: A critical review". *Journal of Cleaner Production* 249 (119359). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119359

Tukker, Arnold, Evgueni Poliakova, Reinout Heijungs, Troy Hawkins, Frederik Neuwahl, José Rueda-Cantuche, Stefan Giljum, Stephan Moll, Joan Oosterhaven y Maaike Bouwmeester. 2009. "Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database". *Ecological Economics* 68 (7): 1928-1937. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.11.010.

United Nations, European Commission, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development y World Bank. 2003. *Integrated Environmental and Economic Accounting 2003: Handbook of National Accounting.* https://unstats.un.org/unsd/environment/seea2003.pdf

Vallejo, María Cristina. 2010. "Perfiles metabólicos de tres economías andinas: Colombia, Ecuador y Perú". Tesis doctoral. FLACSO Ecuador. http://hdl.handle.net/10469/2151

— 2015. *Perfiles metabólicos de tres economías andinas: Colombia, Ecuador y Perú*. Quito: FLACSO Ecuador.

Vallejo, María Cristina, Mario Pérez-Rincón y Joan Martínez-Alier. 2011. "Metabolic Profile of the Colombian Economy from 1970 to 2007". *Journal of Industrial Ecology* 15 (2): 245-267. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00328.x

Voet, Ester van der, Lauran van Oers, e Igor Nikolic. 2005. "Dematerialization: Not just a Matter of Weight". *Journal of Industrial Ecology* 8 (4): 121-137. https://doi.org/10.1162/1088198043630432

Wang, H., B. W. Ang, y Bin Su. 2017. "Assesing drivers of economy-wide energy use and emission: IDA versus SDA". *Energy Policy* 107 (agosto): 585-599. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.034

Weisz, Helga, y Faye Duchin. 2006. "Physical and monetary input-output analysis: What makes the difference?" *Ecological Economics* 57 (3): 534-541. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.05.011.

Weizsacker, Ernst von, Amory B. Lovins y Hunter Lovins. 1997. *Factor Four: Doubling Wealth, Halving Resource Use*. Londres: Earthscan.

West, James, y Heinz Schandl. 2013. "Material Use and Material Efficiency in Latin America and the Caribbean". *Ecological Economics* 94 (octubre): 19-27. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.015.

Wright, David J. 1973. "Calculating energy requirements of commodities from the input/output table". Conferencia presentada en Imperial College, Londres, julio.

— 1974. "Good and services: An input-output analysis". *Energy Policy* 2 (4): 307-315. https://doi.org/10.1016/0301-4215(74)90017-2.

Anexos

Anexo 1

Codificación de los sectores económicos con base en la tabla de utilización Ecuador 2016

Codificación		Descripción
A	B	
1	1	Cultivo de banano, café y cacao
2	2	Cultivo de cereales
3	3	Cultivo de flores
4	4	Cultivo de tubérculos, vegetales, melones y frutas
5	5	Cultivo de oleaginosas e industriales
6	6	Actividades de apoyo a los cultivos
7	7	Cría de ganado, otros animales; productos animales; y actividades de apoyo
8	8	Silvicultura, extracción de madera y actividades relacionadas
9	9	Acuicultura y pesca de camarón
10	10	Pesca (excepto camarón)
11	11	Acuicultura (excepto camarón)
12	12	Extracción de petróleo crudo y gas natural
13	13	Actividades de apoyo a la extracción de petróleo y gas natural
14	14	Explotación de minerales metálicos
15	15	Explotación de minerales no metálicos y actividades de apoyo a las minas y canteras
16	16	Procesamiento y conservación de carne
17	17	Procesamiento y conservación de camarón
18	18	Procesamiento de pescado y otros productos acuáticos elaborados
19	19	Conservación de especies acuáticas
20	20	Elaboración de aceites y grasas de origen vegetal y animal
21	21	Elaboración de productos lácteos
22	22	Elaboración de productos de molinería
23	23	Elaboración de productos de panadería
24	24	Elaboración de fideos y de otros productos farináceos
25	25	Elaboración y refinación de azúcar

Anexo 1. (*continuación*)

Codificación		Descripción
A	B	
26	26	Elaboración de cacao, chocolate y productos de confitería
27	27	Elaboración de alimentos preparados para animales
28	28	Elaboración de café
29	29	Elaboración de otros productos alimenticios diversos
30	30	Elaboración de bebidas alcohólicas
31	31	Elaboración de bebidas no alcohólicas
32	32	Elaboración de productos de tabaco
33	33	Fabricación de hilos, hilados; tejidos y confecciones
34	34	Fabricación de prendas de vestir
35	35	Fabricación de cuero, productos de cuero y calzado
36	36	Producción de madera y de productos de madera
37	37	Fabricación de papel y productos de papel
38	38	Fabricación de productos refinados de petróleo y de otros
39	39	Fabricación de sustancias químicas básicas, abonos y plásticos primarios
40	40	Fabricación de otros productos químicos
41	41	Fabricación de productos de caucho
42	42	Fabricación de productos de plástico
43	43	Fabricación de vidrio, productos refractarios y de cerámica
44		Fabricación de cemento, artículos de hormigón y piedra
45	44	Fabricación de metales comunes
46	45	Fabricación de productos derivados del metal, excepto maquinaria y equipo
47	46	Fabricación de maquinaria y equipo
48	47	Fabricación de equipo de transporte
49	48	Fabricación de muebles
50	49	Industrias manufactureras *ncp
51	50	Generación, captación y distribución de energía eléctrica
52	51	Captación, depuración y distribución de agua; y saneamiento
53	52	Construcción
54	53	Comercio al por mayor y al por menor, incluido comercio de vehículos automotores y motocicletas
55		Servicios de reparación y mantenimiento de vehículos de motor y motocicletas
56	54	Alojamiento
57	55	Servicio de alimento y bebida
58	56	Transporte y almacenamiento
59	57	Actividades postales y de correo
60	58	Comunicaciones e información
61	59	Actividades de servicios financieros
62	60	Financiación de planes de seguro, excepto seguridad social

Anexo 1. (***continuación***)

Codificación		Descripción
A	**B**	
63	61	Actividades inmobiliarias
64	62	Actividades profesionales, técnicas y administrativas
65	63	Administración pública, defensa; planes de seguridad social obligatoria
66	64	Servicios de enseñanza privada
67	65	Servicios de enseñanza pública (no de mercado)
68	66	Servicios sociales y de salud de mercado
69	67	Servicios sociales y de salud no de mercado (públicos)
70	68	Entretenimiento, recreación y otras actividades de servicios
71	69	Hogares privados con servicio doméstico

Nota: A: codificación empleada en los métodos insumo-producto. B: codificación empleada para los indicadores de encadenamientos.

* No clasificado previamente.

Anexo 2
Encadenamientos en el sistema económico

He clasificado los sectores según las características de los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás que les corresponden. Para ello, tomo en cuenta los índices normalizados que miden los efectos totales, es decir, aquellos que incluyen encadenamientos directos e indirectos. No analizo los encadenamientos directos para la actividad económica, así como tampoco los componentes puros y propios de los encadenamientos. Dejaré este tipo de evaluación para el sistema energético.

Cada una de las cuatro categorías que defino en la clasificación que presento a continuación, se subdivide a su vez en cuatro subcategorías de homogeneidad o menos, de acuerdo con las características de los sectores económicos que analizo. En los siguientes gráficos explico los resultados de estas categorizaciones para el caso de la economía ecuatoriana en el año 2016.

Sectores clave

Durante 2016, he identificado nueve sectores clave en la economía ecuatoriana. De ellos, dos son actividades primarias, tres corresponden al sector secundario, sea como manufacturas o productos con algún grado de industrialización y, finalmente, cuatro constituyen actividades de servicios. Los encadenamientos hacia adelante más significativos corresponden a la fabricación de productos refinados de petróleo. En cambio, los encadenamientos hacia atrás más importantes se identifican en el comercio y reparación de automotores.

La condición ideal se identifica en el caso de los sectores con importantes encadenamientos, tanto hacia adelante como hacia atrás, que además son homogéneos; en otras palabras, cuyos coeficientes técnicos convergen o se hallan poco dispersos respecto del resto de los sectores en el grupo. En este caso, un efecto uniforme en todas las actividades reduce el riesgo de desequilibrios en la oferta o en la demanda de insumos. En 2016, he identificado cinco sectores dentro de esta categoría, entre los cuales se encuentra uno primario, la cría de ganado; una actividad manufacturera, la producción de madera y sus productos; y tres son servicios, comercio, transporte y actividades postales (gráfico A.1).

Los sectores clave que presentan heterogeneidad en la demanda concentran sus efectos en un reducido número de actividades de compra de insumos, pero, a su vez, afectan de manera uniforme a las actividades de venta de insumos dentro del sistema. Es interesante observar que, por ejemplo, la fabricación de productos refinados de petróleo o la generación, captación y distribución de la energía eléctrica son sectores clave dentro del sistema, sin embargo, potencialmente pueden atravesar una situación de escasez de insumos porque su abastecimiento depende de una oferta que se halla distribuida de manera uniforme entre todos los sectores. Hay que recordar que estos aspectos los he analizado desde una perspectiva de la provisión económica. Habría que evaluar este riesgo de escasez en unidades energéticas.

Impulsores de la oferta

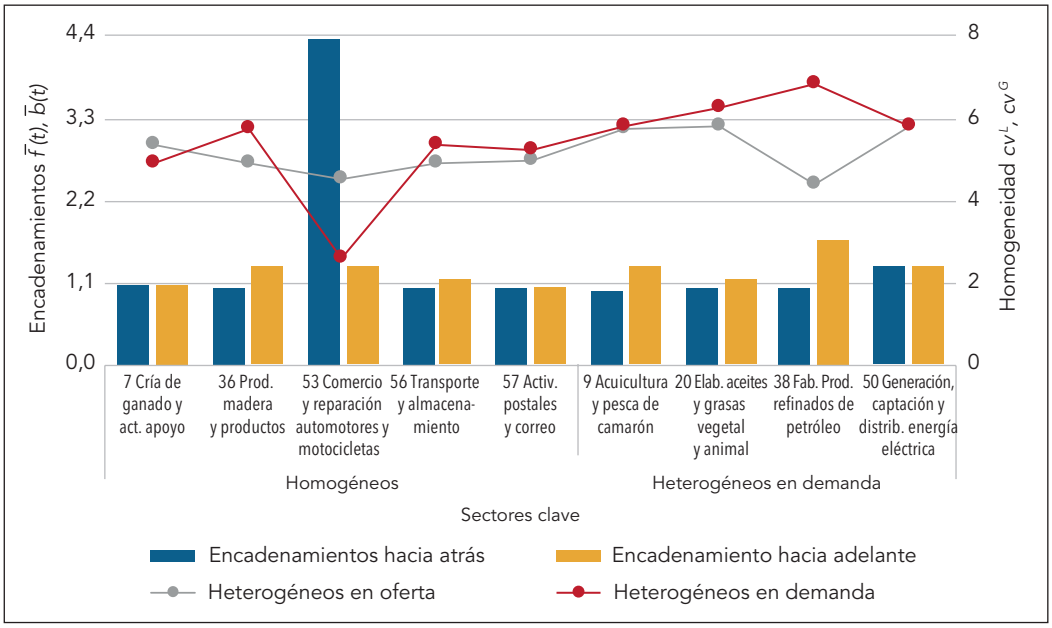
En esta sección describo sectores con importantes encadenamientos desde un enfoque de oferta, que también denomino sectores de base o impulsores de la oferta. Identifico 21 sectores económicos que corresponden a esta categoría, entre los cuales constan ocho primarios, nueve secundarios y cuatro de servicios (gráfico A.2).

En este caso los encadenamientos hacia adelante posicionan a los principales proveedores de insumos del sistema económico, que incluyen las siguientes actividades mineras primarias y secundarias: explotación de minerales metálicos y no metálicos, y fabricación de metales comunes. La fabricación de sustancias químicas y abonos, así como la fabricación de papel, también son fuentes importantes de insumos para el sistema. Dentro del mismo grupo se encuentran las actividades profesionales técnicas y administrativas. Todos estos sectores son homogéneos respecto de la composición de la oferta y, a su vez, heterogéneos con respecto a la demanda. En estas condiciones, la colocación de sus insumos a su vez depende de una demanda que se halla concentrada en un pequeño grupo de actividades, lo que significa que puede existir cierto riesgo de saturar el mercado. En cambio, los sectores que impulsan la oferta y son homogéneos en la oferta y en la demanda presentan menos riesgo de saturar la oferta de insumos. Esta es la característica de la fabricación de productos de plástico, que muestra los encadenamientos hacia adelante más altos del grupo.

Impulsores de la demanda

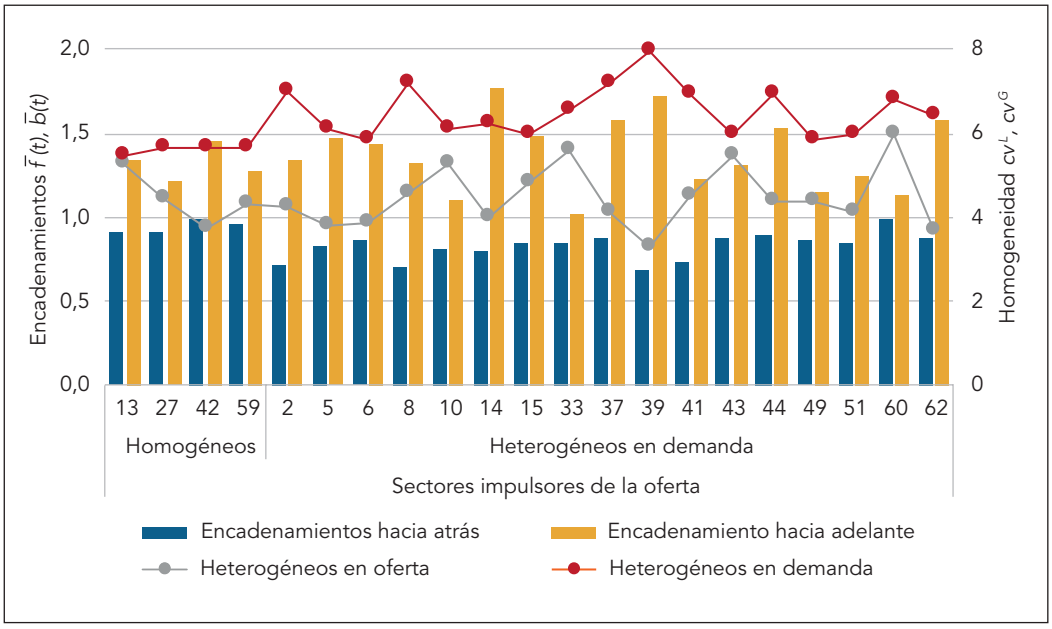
En esta categoría se encuentran 16 actividades económicas, de las cuales solo una es primaria, 11 son secundarias y cuatro son de servicios (gráfico A.3). Como es de esperarse, en todos los casos los encadenamientos hacia atrás superan a los encadenamientos hacia adelante, en una estructura que puede resultar excluyente para determinados sectores en condiciones de heterogeneidad. El procesamiento de camarón y el de cacao son las dos actividades que tienen los más altos encadenamientos hacia atrás.

Gráfico A.1. Sectores económicos clave



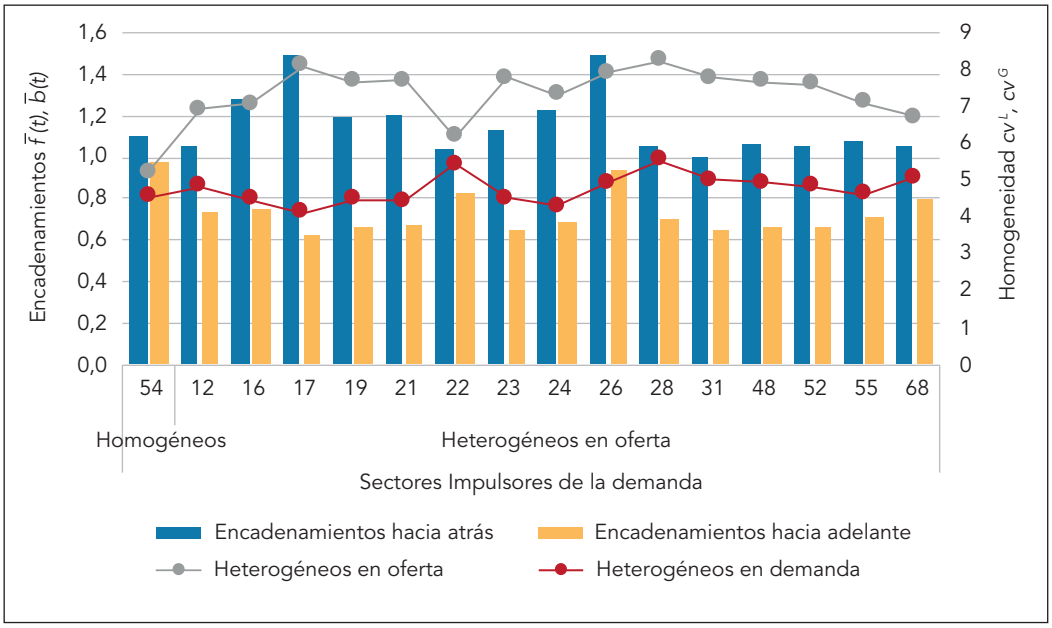
Nota: *Me* (cv^L) = 5,74 (cv^L > 5,74 : Heterogéneo en la demanda), *Me* (cv^G) = 5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta). En el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

Gráfico A.2. Sectores económicos impulsores de la oferta



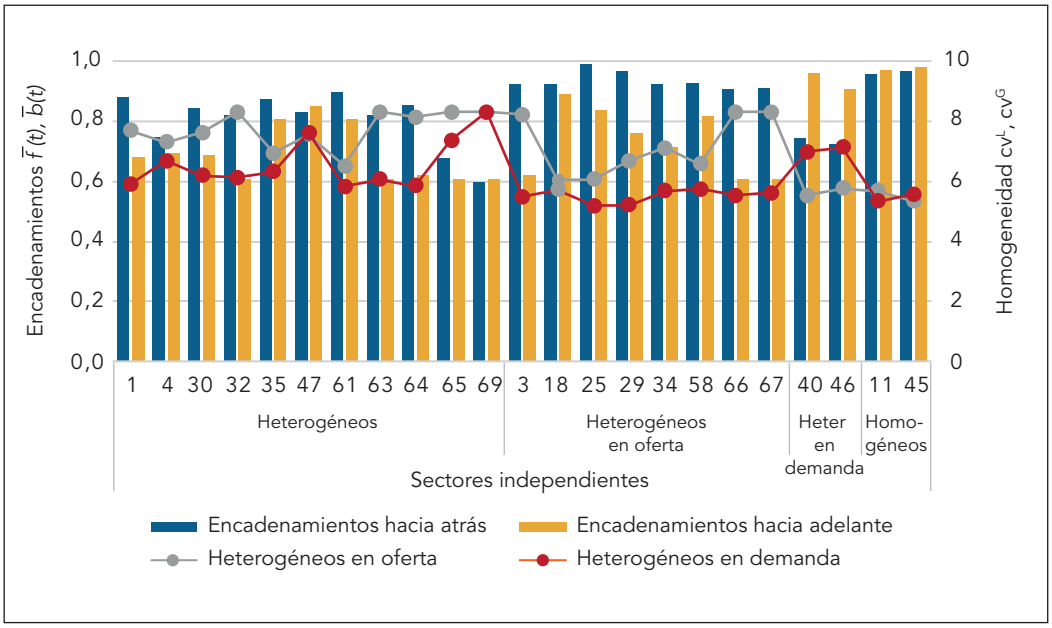
Nota: *Me* (cv^L) = 5,74 (cv^L > 5,74 : Heterogéneo en la demanda), *Me* (cv^G) = 5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta). En el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

Gráfico A.3. Sectores económicos impulsores de la demanda



Nota: *Me* (cv^L) = 5,74 (cv^L > 5,74 : Heterogéneo en la demanda), *Me* (cv^G) = 5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta). En el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

Gráfico A.4. Sectores económicos independientes



Nota: *Me* (cv^L) = 5,74 (cv^L > 5,74 : Heterogéneo en la demanda), *Me* (cv^G) = 5,95 (cv^G > 5,95: Heterogéneo en la oferta). En el anexo 1, codificación B, consta la lista de sectores económicos que se analizan.

El alojamiento constituye el único sector "motor" que es homogéneo, es decir, que su participación se halla distribuida equitativamente entre los distintos sectores de oferta y de demanda de insumos. En estas condiciones se observa bajo riesgo de desabastecimiento en la demanda de insumos.

También se identifica a los sectores motor que impulsan la demanda de insumos y son homogéneos en la demanda y, a su vez, heterogéneos en la oferta. Este es el grupo con el mayor número de sectores que por sus características muestran un riesgo moderado de desequilibrios en la oferta de insumos porque la oferta se halla concentrada en pocas actividades.

Sectores independientes

En este grupo se identifican 23 sectores económicos, entre los cuales se cuentan cuatro actividades primarias, 11 secundarias y ocho de servicios (gráfico A.4). La principal característica de estos sectores es que mantienen vínculos tan débiles con los demás, que no logran consolidar encadenamientos importantes hacia adelante y tampoco hacia atrás, por lo que suelen ser los sectores que quedan relegados respecto del resto del sistema económico. Presento en cada caso la categoría de homogeneidad que corresponde, sin embargo, esta información es puramente referencial por
que no profundizo en este análisis para esta categoría.

En la tarea de analizar las economías en términos físicos (que es lo que más directamente permite apreciar los enormes costes ambientales de la producción interna y de las exportaciones netas), este magnífico trabajo, muy claramente escrito, supone un gran avance no solo para Ecuador sino para toda Latinoamérica.

María Cristina Vallejo fue pionera, hace quince años, en la investigación cuantificada del metabolismo social de la economía ecuatoriana en cuanto a los flujos de materiales. Con un gran salto adelante, empírico y metodológico, en este libro ella estudia los requerimientos energéticos a través de distintas aplicaciones de matrices insumo-producto. Este libro tiene gran relevancia para las políticas públicas y, al mismo tiempo, es un gran instrumento para la enseñanza de un tema central de nuestra época: el necesario uso de energía en la economía y también los distintos efectos negativos producidos.

Joan Martínez Alier
ICTA-Universidad Autónoma de Barcelona

ISBN: 978-9978-67-643-1
9 789978 676431

Editorial FLACSO Ecuador